

· 综 述 ·

开放获取

人工智能技术在骨科应用现状

郭马超, 谢章家, 李宝林, 蔡贤华*

(深圳大学附属华南医院骨科, 广东深圳 518111)

摘要: 随着计算机科学和技术的发展, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 在医学领域, 特别是骨科, 已经显示出令人瞩目的应用前景。本文详细探讨了 AI 在骨科的应用现状、挑战和未来发展趋势。从医学影像的智能解析, 到手术中的 AI 应用, 再到康复中的 AI 探索, AI 正逐步渗透并改变骨科的诊断和治疗方法。AI 提高了医生解读影像资料的准确性, 辅助手术中的精准操作和方案优化, 并在康复阶段监测患者进展, 制定个性化康复计划。尽管目前还面临一些诸如数据安全、技术标准化及验证问题等技术和伦理上的挑战, 但 AI 技术的进一步发展和应用无疑将为骨科医学带来更多的创新和进步。

关键词: 人工智能, 骨科影像, 骨科手术, 骨科康复

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 22-2067-05

Current application of artificial intelligence in orthopedics // GUO Ma-chao, XIE Zhang-jia, LI Bao-lin, CAI Xian-hua. Department of Orthopedics, South China Hospital, Shenzhen University, Shenzhen 518111, China

Abstract: With the development of computer science and technology, artificial intelligence (AI) has shown remarkable application prospects in the field of medicine, especially orthopedics. This paper discusses in detail the current situation, challenges and future development trends of AI in orthopedics. From the intelligent analysis of medical images, to the application of AI in surgery, and then to the exploration of AI in rehabilitation, AI is gradually penetrating and changing the diagnosis and treatment methods of orthopedics. AI has improved the accuracy of doctors' interpretation of image data, assisted precise operation and program optimization in surgery, monitored patient progress in the rehabilitation stage, and formulated personalized rehabilitation plans. Although there are still some technical and ethical challenges such as data security, technical standardization and verification issues, the further development and application of AI technology will undoubtedly bring more innovation and progress to orthopedic medicine.

Key words: artificial intelligence, orthopaedic imaging, orthopaedic surgery, orthopaedic rehabilitation

人工智能 (artificial intelligence, AI) 作为计算机科学的一个显著分支, 专注于构建能够模拟、扩充及拓展人类智慧的智能体。伴随计算机性能的显著提高, AI 技术已从专家系统逐渐演进至机器学习 (machine learning, ML) 阶段, 其中基于大规模数据集训练的深度学习 (deep learning, DL) 模型以其卓越的模式识别能力脱颖而出, 实现了在图像识别和自然语言处理等领域达到或超越人类专业水平的成就^[1]。

在医学实践与研究中, AI 技术也展现出了令人瞩目的进展, 尤其是在医学影像的智能分析领域, AI 已逐渐成为其核心技术和研究重点。进入 21 世纪, ML 驱动的智能影像识别系统在多视图心电图诊断、皮肤病损识别等领域展现出可与专家媲美的水平^[2]。近几年, DL 模型的迅速发展进一步强化了其在医学

影像分析领域的优势, 实现达到或超越专家级别的精确度^[3]。

在高度依赖影像诊断的骨科领域, AI 技术的应用前景亦得到了行业的广泛关注, 其在辅助诊断、手术规划导航和患者管理等多个方面提供了巨大的助力^[4-6]。本文旨在通过系统综述相关文献, 聚焦 AI 在骨科临床和研究中的应用现状、发展及所面临的挑战。

1 骨科影像的智能解析

骨科临床工作极度依赖多种医学影像, 包括 X 线、CT 和 MRI 等, 这些影像的解析直接影响到临床诊断和手术方案的制定。然而, 由于影像解读存在一

定的主观性，不同医生在诊断上可能存在分歧，而智能影像解析系统则能够快速定位影像目标并进行客观定量分析，从而提高诊断效率和一致性。目前，骨科影像识别已成为骨科 AI 研究的焦点之一，并已取得大量研究成果。

1.1 X 线骨折检测与分类

Olczak 等^[7]利用 5 种开源 DL 网络对 25.6 万例腕部、手部和踝部 X 线片进行训练，识别出骨折、身体位置、身体部位和检查视图等 4 个类别。这 5 种网络在 4 个类别的识别上都达到了至少 90% 的准确率，其中骨折识别的最高准确率达到 83%，可与经验丰富的骨科医生表现相媲美。Urakawa 等^[8]使用卷积神经网络对 1 773 例股骨近端骨折 X 线片和 1573 例正常股骨 X 线片进行了判断，与 5 名骨科医生的判断结果相比，该网络的准确率、敏感性和特异性分别达到了 95.5%、93.9% 和 97.4%，超过了骨科医生的总体表现。Cheng 等^[9]采用弱监督的点标记方法，利用 5 204 例骨盆 X 线片训练了 PelviXNet 模型，在 1 888 例临床人群测试集上，该模型获得了骨盆和股骨近端骨折的检出性能，AUC 为 0.973，AU-PRC 为 0.963，与骨科医生的表现相当。可见，DL 模型已经证明能够达到甚至超过专家级别的骨折检测性能。

除了骨折检测，一些研究还让模型进行骨折类型的分类，如 Olczak 等^[10]的模型可以区分踝关节骨折的 AO 类型，Lind 等^[11]的模型可以对膝关节骨折进行 AO 分类。这些模型可以协助医生快速鉴别骨折类型，为手术计划提供依据。

1.2 CT 和 MRI 的骨科应用

在 CT 解析方面，Groot 等^[12]使用极端梯度增强决策树模型来训练骨转移检出算法，该模型在 141 例测试样本上表现出 94% 的敏感性、97% 的阳性预测值和 96% 的 F-1 分数，显示出较高的检出性能。另外，AI 中的卷积神经网络特别适用于 CT 扫描中骨折的检测和分类，可以改善自动诊断和临床医生辅助诊断^[13]。在 MRI 解析方面，Norman 等^[14]使用 DL 模型实现了膝关节 MRI 半月板和软骨的自动分割，Bruil 等^[15]则实现了腕关节 MRI 的软骨自动分割。

CT 和 MRI 不仅可以识别骨科疾病，还可用于骨密度测定和骨龄评估。基于 AI 的自动骨龄评估可以减轻放射科医生处理大量图像以确定骨龄的负担，同时大幅减少了与传统骨龄评估方法相关的主观性以及观察者之间和观察者内部的差异性^[16]。

可见，DL 模型已经被证明能够自动实现 CT 和

MRI 在骨科疾病定位、骨折检测、骨质疏松和骨龄评估等方面的诊断功能，显著提高工作效率，减少误诊和漏诊的风险。

2 骨科手术中的 AI 应用

在现代医疗领域，AI 的崭露头角正在为骨科手术带来革命性的改变。AI 技术的不断进步和创新，使得在骨科手术中应用机器智能成为可能。

2.1 机器人手术助理

在骨科手术中，机器人手术助理的应用主要集中在提高手术精确度、降低手术时间和并发症的风险等方面。有证据表明，机器人辅助的骨科创伤手术可能会减少手术时间、透视的使用及手术中的失血量，并提高螺钉置入的准确度^[17]。

目前，有 14 种类型的机器人被用于骨科手术，主要应用于膝关节和脊柱手术，其中，MAKO 机器人是用于髌关节和膝关节手术的最常用机器人，而 Mazor 机器人主要应用于脊柱手术^[18]。ROSA 膝系统是一个典型的例子，它允许外科医生在手术过程中保持对手术的控制，同时借助机器人工具执行高精度和可重复性的手术操作^[19]。我国自主研发的“天玑”骨科机器人已成功完成了全球首例在导航辅助下进行的胸腰段骨折手术^[20]。之后，骨科机器人在骨科手术中的应用日益深入，研究成果在我国也呈现出逐年攀升的趋势^[21-23]。

2.2 手术规划和模拟

AI 和 3D 技术在手术规划和模拟方面的应用有助于提高手术准备的质量和效率。例如，AI 可以通过分析大量患者数据为外科医生提供个性化的手术方案，从而减少方案的修改次数^[24]。此外，3D 打印技术也用于制作解剖模型，帮助医生进行手术前的模拟，从而改善复杂骨科手术的准备工作的^[25]。3D 图像技术在处理涉及复杂解剖的骨科手术方面具有重要价值，例如骨盆创伤、关节置换和关节周围骨折，这些技术可能成为骨科手术的标准组成部分^[26]。

模拟训练是一种允许医生体验和互动基于现实情况的模拟场景的技术，它可以帮助医生在一个无风险的环境中练习手术技能，从而提高他们的临床表现。模拟方法包括在实验室环境中使用合成骨或尸体模型实施操作训练，以及使用软件工具和计算机模拟器在三维虚拟环境中规划和模拟骨科手术。然而，尽管模拟训练已经被证明可以提高外科医生的技能，但仍需要进一步的研究来确定它在临床环境中的实际效果，

以及如何更准确地评估模拟训练的效果^[27]。

2.3 实时监控和反馈

实时监控和反馈对于提高手术质量和患者安全至关重要。具有触觉系统的机器人，能够根据术前数据提供术中反馈，以实现精确的切割和重建^[28]。在一项研究中，通过采集钻孔过程中的结构性音频记录，利用实时声音传感和 AI 技术来监控和提供反馈，以降低骨科手术中过度钻孔可能对相邻软组织造成损伤的风险^[29]。

在骨科手术中，AI 的应用正改变着传统的医疗方式，为患者提供更加安全和精准的治疗。随着 AI 技术的不断进步，我们期待看到更多创新和应用，以进一步提高骨科手术的质量和效果。

2.4 术后并发症预测

快速发展的 AI 技术已应用于预测骨科手术术后并发症。在全髋关节置换手术中，AI 的应用有助于优化患者选择，并准确预测术后结果、并发症和相关成本^[30]。在脊柱手术中，通过应用 AI 技术，研究人员能够预测术后手术部位感染^[31]。一项关于全肩关节置换术的研究表明，监督 ML 模型可以比共病指数更好地预测术后并发症^[32]。这些研究示例突显了 AI 和 ML 技术在预测骨科手术术后并发症方面的广泛应用前景。通过合适的算法和丰富的临床数据，能够帮助医生更准确地预测术后可能出现的并发症，从而改进治疗计划，减少患者的术后风险。

3 AI 在骨科康复应用的探索

3.1 个性化康复

实现精准康复的核心在于制定符合患者独特需求的个性化计划。AI 技术借助其强大的数据处理和模式识别能力，已应用于康复计划的个性化制定中。例如，通过整合 AI 与物联网技术，配合个性化康复识别系统，可以实时追踪患者康复进度并提供数据支持，从而提高诊断效率^[33]。具体来说，此类系统通过患者身上佩戴的传感器实时收集并上传康复相关数据，随后在网络层面进行一系列 AI 建模处理，包含数据预处理、特征提取、ML 及评估环节，进而构建出精确的识别模型。

3.2 远程康复

远程康复技术允许患者在家中或其他地点享受专业康复服务。电信康复和虚拟物理治疗作为创新且经济有效的方式，特别是使用虚拟现实技术，为远程用户提供了支持。尤其值得注意的是，电信康复在全球

范围内成功地打破了地理位置的限制，通过运用信息技术和通信工具，向所有人开放了专业康复服务的通道，这在新型冠状病毒肺炎大流行期间的重要性和普及度得到了尤为明显的体现^[34]。

3.3 康复评估

在康复效果的评估与优化方面，AI 及机器人技术也展现出显著的潜力和价值。研究发现，借助机器人设备进行康复训练可以定期执行精确的练习，同时在整个恢复期间量化治疗进展。这使得物理治疗师能够依据患者具体的病理状态，精心设计个性化训练协议，并在诊所进行实时监控与调整，机器人设备向患者和治疗师提供即时反馈，助力治疗师精准评估训练进度，并及时调整训练方案，以朝着最佳关节恢复的方向稳步推进^[35]。另外，有研究介绍了一个机器人辅助康复系统，通过与虚拟现实游戏的结合，实现了 3 种不同的训练模式——被动、主动和辅助锻炼，旨在协助前臂受伤患者在恢复过程中逐步重获力量和运动能力^[36]。此外，该系统能够依据患者的运动能力和运动学测量数据，动态调整训练难度，确保整个治疗过程的个性化与系统化并行无阻。

可见，从个性化康复计划制定到远程康复服务的提供，再到康复效果的智能评估与优化，AI 技术均表现出对骨科康复流程的巨大增强和优化潜力，有望在未来进一步促进骨科康复领域的发展和创新。

4 目前挑战

4.1 数据的隐私与安全保护

AI 在骨科的应用作为尖端科技，同样伴随着数据隐私和安全的棘手挑战。在处理敏感的医疗数据时，必须严格遵循极端严密的保护措施，以确保其安全性和私密性得以维护。在骨科的实践中，智能手机及其应用程序的使用无疑增加了数据被误用的风险，构成了一个显而易见的潜在风险点。更进一步，AI 在临床过程中的道德运用及其规范化也成为了需集中解决的问题，以保证 AI 在临床优化及其在传统统计学和决策制定中的平衡运用^[37]。

4.2 AI 技术的标准化和验证

AI 技术在标准化和验证方面的挑战同样备受瞩目。现阶段对 AI 技术的效果和安全性评估仍然缺乏统一的标准和验证体系。这一方面的欠缺无疑限制了 AI 技术在骨科领域广泛、深入的应用。尽管 AI 已表现出其在风险分层、临床决策支持及机器人辅助手术等方面的准确性和便利性，仍然亟待建立明确的标准

和验证机制, 以确保其应用的安全性和有效性^[38]

5 结 论

近年来, AI 技术在医学各个分支领域均取得了显著的进步, 其中骨科的应用研究已成为不可忽视的方向。现阶段, 骨科领域 AI 研究的焦点主要锚定在医学影像的智能解析上, 广泛涵盖 X 线、CT、MRI 等多种影像类型。在多个子领域, 例如骨折的检测与分类、骨骼的分割以及骨质疏松的检测等, DL 模型已展示出卓越的性能。

与此同时, AI 技术正逐步渗透并塑变骨科的临床实践格局。诸如基于患者数字模型的个性化手术设计与导航、机器人辅助的程序化手术以及大数据推动的手术并发症预测等方面均展现出了令人激动的潜在应用价值。智能技术不仅可以协助医生在减轻重复性工作负担上取得突破, 提高手术精准度, 也能深挖隐蔽的关键信息, 以精确进行针对各患者及其预后的预测和评估。

然而, 必须指出, AI 应用在当前阶段仍然面临一些技术上的困境和限制, 如数据集的匮乏、模型泛化能力的不足等。但应坚信, 随着这些技术障碍的逐步克服, 智能技术将更加深入地渗透到骨科临床的各个环节中, 进一步推动病因学、诊断学、治疗学和预后学的全面发展, 最终实现以患者为中心的精准医疗目标。

参考文献

- [1] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep Learning [J]. *Nature*, 2015, 521 (7553): 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.
- [2] Barua A, Ahmed MU, Begum S, et al. A systematic literature review on multimodal machine learning: applications, challenges, gaps and future directions [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 14804-14831. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243854.
- [3] Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks [J]. *Nature*, 2017, 542 (7639): 115-118. DOI: 10.1038/nature21056.
- [4] Meng M, Wang J, Huang H, et al. 3D printing metal implants in orthopedic surgery: methods, applications and future prospects [J]. *J Orthop Transl*, 2023, 42: 94-112. DOI: 10.1016/j.jot.2023.08.004.
- [5] Shetty AP, Raja DC. Current trends and advancements in spine surgery [J]. *J Orthop*, 2023, 44: 31-32. DOI: 10.1016/j.jor.2023.08.002.
- [6] 聂涛, 王卓, 于小龙, 等. 机器人与传统经皮骶髂螺钉固定骨盆后环损伤 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (24): 2226-2231. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.24.04.

- Nie T, Wang Z, Yu XL, et al. Robotic- assisted versus traditional freehand percutaneous sacroiliac screw fixation of posterior pelvic ring injury [J]. *Orthopedic Journal Of China*, 2023, 31 (24): 2226-2231. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.24.04.
- [7] Olczak J, Fahlberg N, Maki A, et al. Artificial intelligence for analyzing orthopedic trauma radiographs [J]. *Acta Orthop*, 2017, 88 (6): 581-586. DOI: 10.1080/17453674.2017.1344459.
- [8] Urakawa T, Tanaka Y, Goto S, et al. Detecting intertrochanteric hip fractures with orthopedist-level accuracy using a deep convolutional neural network [J]. *Skeletal Radiol*, 2019, 48 (2): 239-244. DOI: 10.1007/s00256-018-3016-3.
- [9] Cheng C, Wang Y, Chen H, et al. A scalable physician-level deep learning algorithm detects universal trauma on pelvic radiographs [J]. *Nat Commun*, 2021, 12 (1): 1066. DOI: 10.1038/s41467-021-21311-3.
- [10] Olczak J, Emilson F, Razavian A, et al. Ankle fracture classification using deep learning: automating detailed Ao Foundation/Orthopedic Trauma Association (Ao/Ota) 2018 malleolar fracture identification reaches a high degree of correct classification [J]. *Acta Orthop*, 2021, 92 (1): 102-108. DOI: 10.1080/17453674.2020.1837420.
- [11] Lind A, Akbarian E, Olsson S, et al. Artificial intelligence for the classification of fractures around the knee in adults according to the 2018 Ao/Ota Classification System [J]. *Plos One*, 2021, 16 (4): e248809. DOI: 10.1371/journal.pone.0248809.
- [12] Groot OQ, Bongers MER, Karhade AV, et al. Natural language processing for automated quantification of bone metastases reported in free-text bone scintigraphy reports [J]. *Acta Oncol (Stockholm, Sweden)*, 2020, 59 (12): 1455-1460. DOI: 10.1371/journal.pone.0248809.
- [13] Dankelman LHM, Schilstra S, IJpma FFA, et al. Artificial intelligence fracture recognition on computed tomography: review of literature and recommendations [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2023, 49 (2): 681-691. DOI: 10.1007/s00068-022-02128-1.
- [14] Norman B, Padoia V, Majumdar S. Use of 2D U-net convolutional neural networks for automated cartilage and meniscus segmentation of knee MR imaging data to determine relaxometry and morphometry [J]. *Radiology*, 2018, 288 (1): 177-185. DOI: 10.1148/radiol.2018172322.
- [15] Brui E, Efimtcev AY, Fokin VA, et al. Deep learning-based fully automatic segmentation of wrist cartilage in MR images [J]. *NMR Biomed*, 2020, 33 (8): e4320. DOI: 10.1002/nbm.4320.
- [16] Lee BD, Lee MS. Automated bone age assessment using artificial intelligence: the future of bone age assessment [J]. *Kor J Radiol*, 2021, 22 (5): 792-800. DOI: 10.3348/kjr.2020.0941.
- [17] Schuijt HJ, Hundersmarck D, Smeeing DPJ, et al. Robot-assisted fracture fixation in orthopaedic trauma surgery: a systematic review [J]. *OTA Int*, 2021, 4 (4): e153. DOI: 10.1097/O19.0000000000000153.
- [18] Li C, Wang L, Perka C, et al. Clinical application of robotic orthopedic surgery: a bibliometric study [J]. *BMC Musculoskelet Dis*

- ord, 2021, 22 (1) : 968. DOI: 10.1186/s12891-021-04714-7.
- [19] Batailler C, Hannouche D, Benazzo F, et al. Concepts and techniques of a new robotically assisted technique for total knee arthroplasty: the Rosa Knee System [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141 (12) : 2049-2058. DOI: 10.1007/s00402-021-04048-y.
- [20] 李明, 黄迪超, 李海洋, 等. 骨科机器人导航手术的研究进展 [J]. *中华创伤杂志*, 2019, 35 (4) : 377-384. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2019.04.013.
- Li M, Huang DC, Li HY, et al. Research progress of orthopaedic robot navigation surgery [J]. *Chinese Journal of Trauma*, 2019, 35 (4) : 377-384. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2019.04.013.
- [21] 张治, 董岩, 郭松, 等. 天玑骨科机器人辅助经皮椎体成形术 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (9) : 835-838. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.14.
- Zhang Y, Dong Y, Guo S, et al. Tianji orthopaedic robot assisted percutaneous vertebroplasty [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (9) : 835-838. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.09.14.
- [22] 潘大洋, 刘炯, 龙浩, 等. 机器人导航伤椎置钉固定胸腰椎骨折 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (24) : 2278-2281. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.24.14.
- Pan DY, Liu J, Long H, et al. Robot navigated pedicle screw fixation of thoracolumbar fractures with fractured-vertebrae screw placement [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (24) : 2278-2281. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.24.14.
- [23] 宋涯含, 晁洪露, 田华, 等. 机器人在骨科应用相关研究的国际现状与趋势分析 [J]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2023, 9 (1) : 59-64. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2023.01.011.
- Song YH, Chao HL, Tian H, et al. Global status and research trend of robot application in orthopedics by bibliometric analysis [J]. *Chinese Journal of Geriatric Orthopaedics and Rehabilitation*, 2023, 9 (1) : 59-64. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2023.01.011.
- [24] Lambrechts A, Wirix-Speetjens R, Maes F, et al. Artificial intelligence based patient-specific preoperative planning algorithm for total knee arthroplasty [J]. *Front Robot AI*, 2022, 9: 840282. DOI: 10.3389/frobt.2022.840282.
- [25] Alemayehu DG, Zhang Z, Tahir E, et al. Preoperative planning using 3D printing technology in orthopedic surgery [J]. *Biomed Res Int*, 2021, 2021: 7940242. DOI: 10.1155/2021/7940242.
- [26] Bagaria V, Chaudhary K. A paradigm shift in surgical planning and simulation using 3D graphy: experience of first 50 surgeries done using 3D-printed biomodels [J]. *Injury*, 2017, 48 (11) : 2501-2508. DOI: 10.1016/j.injury.2017.08.058.
- [27] Kalun P, Wagner N, Yan J, et al. Surgical simulation training in orthopedics: current insights [J]. *Adv Med Educ Pract*, 2018, 9: 125-131. DOI: 10.2147/AMEP.S138758.
- [28] Goh EZ, Ali T. Robotic surgery: an evolution in practice [J]. *J Surg Protoc Res Methodol*, 2022, 1: 1-3. DOI: 10.1093/jspmr/snac003.
- [29] Seibold M, Maurer S, Hoch A, et al. Real-Time acoustic sensing and artificial intelligence for error prevention in orthopedic surgery [J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1) : 3993. DOI: 10.1038/s41598-021-83506-4.
- [30] Lopez CD, Gazgalis A, Boddapati V, et al. Artificial learning and machine learning decision guidance applications in total hip and knee arthroplasty: a systematic review [J]. *Arthroplast Today*, 2021, 11: 103-112. DOI: 10.1016/j.artd.2021.07.012.
- [31] Hopkins BS, Mazmudar A, Driscoll C, et al. Using Artificial Intelligence (Ai) to predict postoperative surgical site infection: a retrospective cohort of 4046 posterior spinal fusions [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2020, 192: 105718. DOI: 10.1016/j.clineuro.2020.105718.
- [32] Gowd AK, Agarwalla A, Amin NH, et al. Construct validation of machine learning in the prediction of short-term postoperative complications following total shoulder arthroplasty [J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2019, 28 (12) : e410-e421. DOI: 10.1016/j.jse.2019.05.017.
- [33] Lai Y, Kan Y, Lin Y, et al. AIoT-enabled rehabilitation recognition system-exemplified by hybrid lower-limb exercises [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21 (14) : 4761. DOI: 10.3390/s21144761.
- [34] Lal H, Mohanta S, Kumar J, et al. Telemedicine-rehabilitation and virtual reality in orthopaedics and sports medicine [J]. *Indian J Orthop*, 2023, 57 (1) : 7-19. DOI: 10.1007/s43465-022-00766-6.
- [35] Koller-Hodac A, Leonardo D, Walpen S, et al. Knee orthopaedic device how robotic technology can improve outcome in knee rehabilitation [J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2011, 2011: 5975347. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975347.
- [36] Padilla-Castañeda MA, Sotgiu E, Barsotti M, et al. An orthopaedic robotic-assisted rehabilitation method of the forearm in virtual reality physiotherapy [J]. *J Healthc Eng*, 2018, 2018: 7438609. DOI: 10.1155/2018/7438609.
- [37] Myers TG, Ramkumar PN, Ricciardi BF, et al. Artificial intelligence and orthopaedics: an introduction for clinicians [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2020, 102 (9) : 830-840. DOI: 10.2106/JBJS.19.01128.
- [38] Makhni EC, Makhni S, Ramkumar PN. Artificial intelligence for the orthopaedic surgeon: an overview of potential benefits, limitations, and clinical applications [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2021, 29 (6) : 235-243. DOI: 10.5435/JAAOS-D-20-00846.

(收稿:2023-11-06 修回:2024-06-15)

(同行评议专家: 殷庆丰, 马立学, 孔庆波, 刘家国)

(本文编辑: 宁桦)