

人工智能在关节外科中的应用进展

陈奉勇¹, 李梁涛^{2*}

¹济宁医学院临床医学院, 山东 济宁

²济宁医学院附属医院关节与运动医学科, 山东 济宁

收稿日期: 2023年11月27日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月27日

摘要

近年来, 伴随计算机科学的进步, 人工智能在多个行业和领域都得到了广泛应用。在关节外科中, 人工智能技术可以在疾病的影像学分析及诊断、术前规划、术中操作技术等多方面发挥作用。本研究在查阅大量中外文献的基础上, 简要介绍了应用于关节外科中人工智能的技术分类, 具体的应用方向及相关局限性, 以期为临床工作及未来的研究工作提供参考。

关键词

人工智能, 关节外科, 研究进展

Advances in the Application of Artificial Intelligence in Joint Surgery

Fengyong Chen¹, Liangtao Li^{2*}

¹School of Clinical Medicine, Jining Medical University, Jining Shandong

²Department of Joint and Sports Medicine, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining Shandong

Received: Nov. 27th, 2023; accepted: Dec. 21st, 2023; published: Dec. 27th, 2023

Abstract

Recently, with the development of computer science, artificial intelligence has been widely used in many industries and fields. In joint surgery, artificial intelligence technology can play an important part in image analysis and diagnosis, preoperative planning, operation technique and etc. Based on a large amount of Chinese and foreign literatures, this paper briefly introduces the technical classification, specific application direction and related limitations of artificial intelligence in joint surgery, in order to provide reference for clinical work and future research work.

*通讯作者。

Keywords

Artificial Intelligence, Joint Surgery, Research Progress

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2010 年至今, 得益于计算机技术的迅速进步, 人工智能(Artificial Intelligence, AI)取得了巨大的突破和进展[1]。人工智能(AI)最早是 John Mc Carthy 创造的一个术语, 一开始仅作为一个理论, 可以理解为计算机最终可以通过模式识别学会执行任务, 而且几乎不需要人类参与, 人工智能的一个更现代、更准确的定义是应用算法, 使机器具有解决传统上需要人类智能的问题的能力[2]。人工智能的核心是由能完成人类智力与生俱来特点的工作的机器组成。这包括规划、理解语言、识别模式、学习和解决问题。更关键的是, 人工智能能够从失误中汲取教训并改进, 这类似于经验学习。人工智能作为新生代工具在各行各业都在不断深化应用, 关节外科领域的应用研究正在如火如荼地开展。尽管关节置换术在治疗终末期关节疾病方面取得了重大成功, 但是多种并发症的出现及患者的不满意提示我们仍需进一步研究[3] [4] [5]。人工智能在关节外科的围手术期多方面的应用研究初步显示出优良结果, 而且越来越多的学者认为这项技术是可以提高手术精度, 继而改进患者临床结局。本文通过检索国内外数据库, 了解人工智能在关节外科领域的技术分类, 把握应用热点, 明确应用局限性, 以期为临床工作及未来的研究工作提供参考。

2. 关节外科领域的人工智能技术分类

人工智能是研究和发​​展人类智能的理论、方法、技术和应用体系的一门新兴的技术学科由于不同职业的需求不同, AI 的技术种类繁多。当前, 主要应用于关节外科的 AI 技术包括以下五类:

2.1. 机器学习(Machine Learning, ML)

机器学习(Machine Learning, ML): 利用以前观察到的真实世界数据建立或学习统计模型, 以预测结果或根据人类提供的“训练”对观察结果进行分类的过程。然后将这些预测应用于未来的数据, 同时将新数据折叠到其不断改进和校准的统计模型中[6]。ML 可以用于预测术后关节置换的住院时间、费用、输血风险以及术后满意度等[7]。此外, 机器学习还可以预测置换术中组件的大小, 并预测术后结果。

2.2. 深度学习(Deep Learning, DL)

深度学习(Deep Learning, DL): 它是从样本数据本身所蕴含的规则与表达层面出发, 为文本、图片、语音等资料的解读提供有力的支持。其终极目的是使机器具备像人类那样的分析性学习能力, 并能识别文字, 图像, 声音等资料。DL 是机器学习研究的一个新方向。它可以让机器模拟人的视觉、听觉、思维等行为, 从而解决了许多复杂的模式识别问题, 从而使人工智能的技术有了长足的发展[8]。深度学习可以用于准确识别 X 射线图像, 诊断并分类骨关节疾病[9] [10]。在术后复查影像中, 深度学习可以指出假体的类型, 并区分不同的关节置换设计, 并判断假体是否松动。

2.3. 人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANNs)

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANNs): 模拟动物神经网络的行为特性, 实现分布、平行的信息处理。该网络依赖于系统的复杂性, 调节其内部众多结点间的连通性, 实现对数据的处理。ANN 具有自学习、自适应性的特点, 它能够通过事先给定的一系列相关的输入-输出数据, 对二者的内在规律进行分析、把握, 最后利用新的输入数据, 对输出结果进行推断, 该学习分析的过程被称作“训练”。ANNs 可以用于预测 TKA 的住院时间、费用和出院安排等[11]。通过使用术前和术中的变量, 人工神经网络可以预测术后何时出院。

2.4. 卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNNs)

卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNNs): 是一类包含卷积计算且具有深度结构的前馈神经网络。与深度学习相似, 卷积神经网络也可以用于识别和分类膝关节骨关节炎及检测假体松动[12] [13] [14]。

2.5. 远程患者监测(Remote Patient Monitoring, RPM)

远程患者监测(Remote Patient Monitoring, RPM): 远程患者监测使用移动健康技术, 属于远程医疗的一种, 可以帮助医生根据术后康复情况, 制定更科学的康复方案, 并进行远程监测和指导。AI 加持下 RPM 大大增加了工作效率, 还可以减轻医生的工作负担, 保障患者术后康复质量[15]。

3. AI 在关节外科的应用

随着人工智能技术的飞速发展, 其在医疗领域的应用也越来越广泛。在关节外科领域, 人工智能的应用也取得了许多进展, 为关节疾病诊断、手术规划和术中指导等许多方面提供了新的解决方案。

3.1. AI 辅助关节疾病的诊断

人工智能技术可以通过大数据分析和机器学习算法, 帮助医生更准确地判断患者的疾病类型和病情严重程度。人工智能辅助医学影像是通过多种机器学习模型对关节影像进行自动分析, 可自动对骨关节炎、股骨头坏死等常见关节外科疾病进行影像诊断, 可减轻骨科医生的工作量, 提高工作效率, 并对疾病预后进行量化评估。基于最广泛使用的 Kelling-Lawrence (KL)分类系统, Tiulpin 等人[16]开发了一种基于 CNNs 的自动分级模型, 对既往文献中标准膝关节和骨性关节炎患者的 X 线图片的系统学习, 测试新患者的 X 线图片, 结果表明 AI 诊断与关节外科医师诊断相当。采用相似的研究方法, Norman 等人[17]和 Adam 等人[18]的研究得出了上述类似的结论。Li 等人[9]的研究则表明 DL 模型比放射科医生有更好的诊断精度, DL 模型比经验丰富的放射科医生表现更好。人工智能不仅可以协助处理骨关节医学成像数据, 例如组织分割和病变识别, 还可以提示后续治疗方案。在最近的一项研究中, Leung 等人[10]开发了一种 DL 模型, 可以根据膝关节 X 光片直接预测了骨关节炎的进展和全膝关节置换术的需求。El-Galaly 等人[19]首次尝试使用 ML 算法来预测早期翻修全膝关节置换术(Total knee arthroplasty, TKA)。术后关节假体的松动是关节置换术后的常见并发症, Man-Soo 等人[13]的 CNNs 可以准确检测出 TKA 植入物松动, 且检测结果具有较高的准确性。人工智能模型在减轻医生负担, 提高诊断准确性并提示治疗方案方面表现出明显优势。

3.2. 手术相关风险评估

在关节外科临床中, 手术并发症风险评估是进行外科手术之前的重要环节, 直接关系到手术过程的风险评估, 对外科医生对手术过程的把握和加强医患关系的沟通有重要意义。传统评估方式繁琐, 数据庞

杂, 给临床医师带来了不小负担, 且准确性难以保证。如 Klemm 等人[20]通过 ML 建立数据模型, 用于预测有翻修患者在翻修 TKA 后出现假体周围感染(Prosthetic joint infection, PJI)的可能性。随后, Nie 等人[21]研究了应用基于 ^{99m}Tc -亚甲基二膦酸盐(^{99m}Tc -MDP)动态骨显像的人工智能诊断初始关节置换术(全髋关节置换术 Total hip arthroplasty, THA 或全膝关节置换术 Total knee arthroplasty, TKA)后患者的 PJI, 结果表现出与骨科医师相似的诊断率。在另外一项研究[22]中, 深度学习模型可以有效、准确地预测 TKA 后下肢全长 X 线片中的髋关节膝关节踝关节角(hip knee ankle angle, HKAA)。AI 可以准确地诊断 THA 后髋关节假体松动, 并预测 THA 术后 5 年脱位风险[23]。Park 等人[24]的 AI 技术可以更好的识别 TJA 后不同级别医院影响住院时长的患者因素。在术后康复和患者依从性方面, Ramkumar 等人[25]建立的 AI 和 RPM 结合的模型可以实时反馈康复指导与患者的恢复, 并推送通知提醒患者进行练习和完成调查, 这种技术通过捕获治疗过程中的不依从性, 为外科医生提供了确定不良结果的潜在原因的机会。总之, AI 在手术相关风险预测中的应用研究显示可喜的成果。

3.3. AI 辅助术前规划

在手术规划方面, 人工智能可以根据患者的影像资料和临床资料, 为医生提供个性化的手术方案。通过仿真技术和三维重建, 人工智能可以帮助医生精确测量患者的骨骼结构、关节运动范围等信息, 为手术提供更精准的参数和方案, 提高手术的成功率和效果。THA 或 TKA 术前计划是保证手术安全的关键, 而最精确的术前计划是以三维影像为依据的, 而现有的三维计划软件操作复杂、耗时长, 不能广泛应用; 在此背景下, AI 技术辅助进行术前规划应运而生。

Chen 等人[26]开发了一种用于全髋关节置换术的综合性人工智能术前规划系统(AIHIP), 并验证了其临床表现较高的准确性。与传统的 X 线模板相比, 该系统提供了更准确的手术计划。通过实现患者特定解剖结构的精确可视化, AIHIP 系统实现了更好的手术方案, 可能减少术后并发症和获得更佳临床效果。在关节翻修手术前识别关节置换植入物会浪费大量的时间和资源, 有高达 10% 的植入物在手术前无法被识别, Paul 等人[14]的研究首次证明了 CNNs 识别和分类膝关节置换术部件的能力, 并自动区分 TKA 和膝关节单髁置换术(Unicompartmental Knee Arthroplasty, UKA)。Karnuta 等人[27]采用 DL 算法训练和验证由 424 名患者的 682 张 X 光片数据集后, 完美区分出来自 4 家制造商的 9 种独特膝关节假体, 并在随后的研究[28]中进一步表现出了良好的内部和外部验证, 而且可以以每张图像 0.02 秒的平均速度对植入物进行快速分类。Klemm 等人[29]使用 DL 算法的模型可以精准地从平片中识别 24 种 THA 植入物和 14 种 TKA 植入物。Evan 等人[30]的 ML 算法预测模型预测股骨和胫骨植入物的准确率可达 80% 以上。通过使用 AI 来自动完善术前计划和预测植入物的尺寸可以显著提高手术计划的准确性, 增强了术前抗风险能力, 还大大减少了外科医生准备所需的时间, 提高了整体手术效率, 并可能提升患者满意度。

3.4. AI 辅助术中操作

人工智能可以通过增强现实技术, 为医生提供实时的影像引导和手术操作建议。在手术过程中, 医生可以通过智能眼镜或头盔, 直接看到患者的内部结构, 同时得到人工智能系统的实时分析和提示, 帮助他们更加精准地进行手术操作。人工智能在骨科手术导航中发挥了重要作用。传统的手术导航系统通常基于 CT 或 MRI 图像, 但这些图像往往存在精度不高、更新不及时等问题。而人工智能技术可以通过深度学习等方法, 对图像进行自动处理和分析, 提高手术导航的精度和效率。Rodrigues 等人[31]提出了一种基于 DL 的有效方法与基于几何的稳健算法相结合的无标记导航系统, 可帮助外科医生准确实施 TKA 手术。该系统使用移动式摄像头取代现有的光学跟踪系统, 无需跟踪标记。Félix 等人[32]采用相似的无标记导航系统显示出积极的结果。Verstraete 等人[33]的基于 479 个原发性全膝关节和 1305 个相关手

术决策建立的 ML 模型, 可以应用术中传感技术显示软组织平衡、力线的对齐, 矢状面畸形等, 从而指导术者术中做出正确的决策。上述研究成果可以用于计算机导航和骨科机器人的术中解剖定位, 但总的说来, 相关文献数量较少, 其原因可归为计算机导航和骨科机器人并未广泛普及。目前, 计算机导航和手术机器人辅助骨科手术存在学习曲线长、定位要求高、效率不高等问题, 而人工智能作为一种强有力的工具, 其应用可能极大地克服传统技术和设备的不足, 其与新技术结合的研究前景广阔。

3.5. 卫生经济学指标预测

利用基于现有的医联体注册数据与多项抽样调查数据, 构建基于机器学习的多学科交叉融合模型, 以实现住院总费用、住院天数等健康经济指标的预测。在实行单病种付费制度的情况下, 这个人工智能应用场景的重要性是显而易见的。例如, Sergio 等人的机器学习模型完美的预测了初次全膝关节置换治疗期间患者的住院费用和住院时间[7]。

4. 当前局限性及未来发展方向

上述研究的积极成果使大多数学者对 AI 技术持积极态度。这些技术不仅被视为简单的外科手术工具, 也是实现个性化医疗原则的重要推手。然而, 挑战依然存在, 包括以下方面: (1) 临床数据人群偏差: 目前公开的数据主要来源于欧美地区, 尚无中国和亚洲人的大样本肌骨影像和骨关节炎数据库。基于这些数据建立起来的辅助诊断体系或者说预测模式并不一定适用于中国人, 因此建立国内人群的数据库更为迫切; (2) 大量数据集训练: 这通常需要建立国内大型关节中心密切合作机制; (3) 缺乏成熟的软件: 虽然基于影像和其他临床信息的人工智能辅助诊断和预测模型已经开发出来, 但目前还没有成熟的产品可以应用于临床, 离临床应用还有很长的路要走; (4) 数据信息不全面: 基于影像的人工智能还无法整合其他临床信息, 如病史、体征、实验室检查等, 进行综合判断, 以提高临床决策诊断的准确性。未来的研究需要跨学科医生和多学科科研人员进行深入广泛的合作, 开发出能够真正用于临床的可行产品。

未来的研究重点是改进人工智能算法, 以更广泛的姿态应用于围手术期的各个方面, 最终促进手术后的整体功能恢复及提高患者满意度。此外, 人工智能与虚拟现实和增强现实等其他技术的融合可能会彻底改变外科手术。例如, 在导航及手术机器人辅助过程中集成人工智能算法进行自主决策可能会导致更精确和更有效的手术。虽然外科医生的作用仍然不可或缺, 但人工智能和机器人技术有助于增强他们的能力, 提高患者的治疗效果和满意度。然而, 要充分利用这些进步, 还需要应对一些挑战。展望未来, 随着我们不断完善和探索这些技术, 骨科手术的未来充满了机遇。

微创化、精准化和个性化是关节外科的未来发展方向[34], AI 技术强调了骨科从基于经验的治疗到基于数据的治疗的转变, 以及基于个体患者差异的个性化定位的必要性。以上 AI 技术的应用, 不仅可以总结以往经验, 充分论证可行性、合理性, 而且可以根据现有的医疗资源, 提出新的髌、膝置换手术理念, 并对这些理念进行积极地探索和验证。在将来, 我们还可以通过数字化影像成像分析、人工智能等手段, 为每个病人制定个性化的手术计划, 甚至对其进行个性化定制。在此基础上, 结合计算机导航、机器人、压力传感器等精密仪器, 实现精确手术, 并在此基础上, 进一步完善髌膝关节置换术基础理论。

作为一名骨科医师, 我们有必要掌握人工智能在关节手术中的最新发展, 并对其带来的便利、存在的问题进行自己的反思, 以便更好地应用这些技术, 探寻更好的治疗方法, 为更多的病人服务, 提高疗效, 提升病人的满意度。目前的关节置换机器人依然存在着学习曲线长、手术时间长效率低、价格昂贵等问题, 但相信在人工智能加持和算法的不断优化下, 人工关节置换机器人将会越来越精准化、智能化和微创化, 这是关节外科未来发展的必然趋势。人工智能在关节外科领域的应用进展有了突破, 为患者带来了更精准的诊断、更个性化的治疗方案和更安全的手术操作体验, 同时也为医生减轻了工作压力,

有望进一步降低手术并发症发生率, 最终提高患者满意度。随着技术的不断进步, 相信人工智能在关节外科领域的应用前景将会更加广阔。然而, 人工智能技术在骨科手术中的应用还存在一些挑战和问题, 如数据获取、数据标注、模型可解释性等问题。未来我们需要进一步研究和探索这些问题, 以实现人工智能技术在骨科手术中的更广泛应用。

参考文献

- [1] Chen, M. and Decary, M. (2020) Artificial Intelligence in Healthcare: An Essential Guide for Health Leaders. *Healthcare Management Forum*, **33**, 10-18. <https://doi.org/10.1177/0840470419873123>
- [2] Myers, T.G., Ramkumar, P.N., Ricciardi, B.F., et al. (2020) Artificial Intelligence and Orthopaedics: An Introduction for Clinicians. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, **102**, 830-840. <https://doi.org/10.2106/JBJS.19.01128>
- [3] Gómez-Barrena, E. and García-Rey, E. (2019) Complications in Total Joint Arthroplasties. *Journal of Clinical Medicine*, **8**, Article 1891. <https://doi.org/10.3390/jcm8111891>
- [4] Sepehri, A., Howard, L.C., Neufeld, M.E., et al. (2022) Compartment Syndrome after Hip and Knee Arthroplasty. *Orthopedic Clinics of North America*, **53**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2021.08.002>
- [5] Curlewis, K., Leung, B., Sinclair, L., et al. (2023) Systemic Medical Complications following Joint Replacement: A Review of the Evidence. *The Annals of the Royal College of Surgeons of England*, **105**, 191-195. <https://doi.org/10.1308/rcsann.2022.0012>
- [6] Rubinger, L., Gazendam, A., Ekhtiari, S. and Bhandari, M. (2023) Machine Learning and Artificial Intelligence in Research and Healthcare. *Injury*, **54**, S69-S73. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.01.046>
- [7] Navarro, S.M., Wang, E.Y., Haerberle, H.S., et al. (2018) Machine Learning and Primary Total Knee Arthroplasty: Patient Forecasting for a Patient-Specific Payment Model. *The Journal of Arthroplasty*, **33**, 3617-3623. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2018.08.028>
- [8] Taunton, M.J., Liu, S.S. and Mont, M.A. (2023) Deep Learning: Orthopaedic Research Evolves for the Future. *The Journal of Arthroplasty*, **38**, 1919-1920. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.08.070>
- [9] Li, W., Xiao, Z., Liu, J., et al. (2023) Deep Learning-Assisted Knee Osteoarthritis Automatic Grading on Plain Radiographs: The Value of Multiview X-Ray Images and Prior Knowledge. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **13**, 3587-3601. <https://doi.org/10.21037/qims-22-1250>
- [10] Leung, K., Zhang, B., Tan, J., et al. (2020) Prediction of Total Knee Replacement and Diagnosis of Osteoarthritis by Using Deep Learning on Knee Radiographs: Data from the Osteoarthritis Initiative. *Radiology*, **296**, 584-593. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020192091>
- [11] Jiřík, M., Moulisová, V., Hlaváč, M., et al. (2022) Artificial Neural Networks and Computer Vision in Medicine and Surgery. *Rozhledy v Chirurgii*, **101**, 564-570. <https://doi.org/10.33699/PIS.2022.101.12.564-570>
- [12] Soffer, S., Ben-Cohen, A., Shimon, O., et al. (2019) Convolutional Neural Networks for Radiologic Images: A Radiologist's Guide. *Radiology*, **290**, 590-606. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018180547>
- [13] Kim, M.S., Cho, R.K., Yang, S.C., et al. (2023) Machine Learning for Detecting Total Knee Arthroplasty Implant Loosening on Plain Radiographs. *Bioengineering*, **10**, Article 632. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060632>
- [14] Yi, P.H., Wei, J., Kim, T.K., et al. (2020) Automated Detection & Classification of Knee Arthroplasty Using Deep Learning. *Knee*, **27**, 535-542. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2019.11.020>
- [15] Zoppo, G., Marrone, F., Pittarello, M., et al. (2020) AI Technology for Remote Clinical Assessment and Monitoring. *Journal of Wound Care*, **29**, 692-706. <https://doi.org/10.12968/jowc.2020.29.12.692>
- [16] Tiulpin, A., Thevenot, J., Rahtu, E., et al. (2018) Automatic Knee Osteoarthritis Diagnosis from Plain Radiographs: A Deep Learning-Based Approach. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 1727. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20132-7>
- [17] Norman, B., Pedoia, V., Noworolski, A., et al. (2019) Applying Densely Connected Convolutional Neural Networks for Staging Osteoarthritis Severity from Plain Radiographs. *Journal of Digital Imaging*, **32**, 471-477. <https://doi.org/10.1007/s10278-018-0098-3>
- [18] Schwartz, A.J., Clarke, H.D., Spangehl, M.J., et al. (2020) Can a Convolutional Neural Network Classify Knee Osteoarthritis on Plain Radiographs as Accurately as Fellowship-Trained Knee Arthroplasty Surgeons. *The Journal of Arthroplasty*, **35**, 2423-2428. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.04.059>
- [19] El-Galaly, A., Grazal, C., Kappel, A., et al. (2020) Can Machine-Learning Algorithms Predict Early Revision TKA in the Danish Knee Arthroplasty Registry. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **478**, 2088-2101. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000001343>

- [20] Klemt, C., Yeo, I., Harvey, M., *et al.* (2023) The Use of Artificial Intelligence for the Prediction of Periprosthetic Joint Infection following Aseptic Revision Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Knee Surgery*. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1761259>
- [21] Nie, L., Sun, Z., Shan, F., *et al.* (2023) An Artificial Intelligence Framework for the Diagnosis of Prosthetic Joint Infection Based on (99m) Tc-MDP Dynamic Bone Scintigraphy. *European Radiology*, **33**, 6794-6803. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09687-w>
- [22] (2022) Deep Learning Method for Hip Knee Ankle Angle Prediction on Postoperative Full-Limb Radiographs of Total Knee Arthroplasty Patients. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, **2022**, 5070-5073.
- [23] Gurung, B., Liu, P., Harris, P., *et al.* (2022) Artificial Intelligence for Image Analysis in Total Hip and Total Knee Arthroplasty: A Scoping Review. *The Bone & Joint Journal*, **104**, 929-937. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.104B8.BJJ-2022-0120.R2>
- [24] Park, J., Zhong, X., Miley, E.N., *et al.* (2023) Preoperative Prediction and Risk Factor Identification of Hospital Length of Stay for Total Joint Arthroplasty Patients Using Machine Learning. *Arthroplasty Today*, **22**, Article ID: 101166. <https://doi.org/10.1016/j.artd.2023.101166>
- [25] Ramkumar, P.N., Haerberle, H.S., Bloomfield, M.R., *et al.* (2019) Artificial Intelligence and Arthroplasty at a Single Institution: Real-World Applications of Machine Learning to Big Data, Value-Based Care, Mobile Health, and Remote Patient Monitoring. *The Journal of Arthroplasty*, **34**, 2204-2209. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2019.06.018>
- [26] Chen, X., Liu, X., Wang, Y., *et al.* (2022) Development and Validation of an Artificial Intelligence Preoperative Planning System for Total Hip Arthroplasty. *Frontiers in Medicine*, **9**, Article 841202. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.841202>
- [27] Karnuta, J.M., Luu, B.C., Roth, A.L., *et al.* (2021) Artificial Intelligence to Identify Arthroplasty Implants from Radiographs of the Knee. *The Journal of Arthroplasty*, **36**, 935-940. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.10.021>
- [28] Karnuta, J.M., Shaikh, H., Murphy, M.P., *et al.* (2023) Artificial Intelligence for Automated Implant Identification in Knee Arthroplasty: A Multicenter External Validation Study Exceeding 3.5 Million Plain Radiographs. *The Journal of Arthroplasty*, **38**, 2004-2008. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.03.039>
- [29] Klemt, C., Uzosike, A.C., Cohen-Levy, W.B., *et al.* (2022) The Ability of Deep Learning Models to Identify Total Hip and Knee Arthroplasty Implant Design From Plain Radiographs. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **30**, 409-415. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-21-00771>
- [30] Polce, E.M., Kunze, K.N., Paul, K.M., *et al.* (2021) Machine Learning Predicts Femoral and Tibial Implant Size Mismatch for Total Knee Arthroplasty. *Arthroplasty Today*, **8**, 268-277.E2. <https://doi.org/10.1016/j.artd.2021.01.006>
- [31] Rodrigues, P., Antunes, M., Raposo, C., *et al.* (2019) Deep Segmentation Leverages Geometric Pose Estimation in Computer-Aided Total Knee Arthroplasty. *Healthcare Technology Letters*, **6**, 226-230. <https://doi.org/10.1049/hftl.2019.0078>
- [32] Félix, I., Raposo, C., Antunes, M., *et al.* (2021) Towards Markerless Computer-Aided Surgery Combining Deep Segmentation and Geometric Pose Estimation: Application in Total Knee Arthroplasty. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, **9**, 271-278. <https://doi.org/10.1080/21681163.2020.1835554>
- [33] Verstraete, M.A., Moore, R.E., Roche, M. and Conditt, M.A. (2020) The Application of Machine Learning to Balance a Total Knee Arthroplasty. *Bone & Joint Open*, **1**, 236-244. <https://doi.org/10.1302/2633-1462.16.BJO-2020-0056.R1>
- [34] 田华. 机器人辅助人工髌膝关节置换手术是必然趋势[J]. 中华医学杂志, 2022, 102(1): 4-8.