

人工智能在骨科学领域中的应用前景及现状

王思成¹, 乔新村¹, 段续东², 胡守业², 杨 治^{2*}

¹西安医学院研究生院, 陕西 西安

²西安市红会医院关节病医院关节翻修病区, 陕西 西安

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月18日

摘 要

随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的飞速发展, 其在骨科学领域的应用范围不断扩大。本文对人工智能在骨科学领域的应用现状展开全面综述, 涵盖疾病诊断、治疗、康复指导、医学生教育与培训以及患者沟通等多个方面, 并深入探讨其应用前景和面临的挑战。研究结果显示, 人工智能在骨科学领域拥有广阔的应用前景, 具备提高诊断准确性、制定个性化治疗方案、支持远程医疗和基层医疗、预测疾病风险等诸多优势。不过, 其应用过程中也面临着数据隐私和安全保障、算法可解释性提升以及缺乏统一行业标准等挑战。未来, 随着技术的持续进步和相关问题的逐步解决, 人工智能有望在骨科学领域发挥更为重要的作用。

关键词

人工智能, 骨科学, 应用现状, 应用前景, 挑战

The Current Status and Application Prospects of Artificial Intelligence in the Field of Orthopedics

Sicheng Wang¹, Xincun Qiao¹, Xudong Duan², Shouye Hu², Zhi Yang^{2*}

¹School of Graduate, Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Joint Revision, Joint Disease Hospital, Xi'an Honghui Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 15th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 18th, 2025

Abstract

With the rapid development of Artificial Intelligence (Artificial Intelligence, AI) technology, its

*通讯作者。

文章引用: 王思成, 乔新村, 段续东, 胡守业, 杨治. 人工智能在骨科学领域中的应用前景及现状[J]. 临床医学进展, 2025, 15(9): 1138-1145. DOI: 10.12677/acm.2025.1592603

application scope in the field of orthopedics is constantly expanding. This article conducts a comprehensive review of the current application status of AI in orthopedics, covering multiple aspects such as disease diagnosis, treatment, rehabilitation guidance, education and training of medical students, and communication with patients, while also delving into its application prospects and the challenges it faces. The research results indicate that AI has broad application prospects in orthopedics, with numerous advantages including improving diagnostic accuracy, formulating personalized treatment plans, supporting telemedicine and primary healthcare, and predicting disease risks. However, during its application process, it also encounters challenges such as ensuring data privacy and security, enhancing the interpretability of algorithms, and the lack of unified industry standards. In the future, as technology continues to advance and related issues are gradually resolved, AI is expected to play a more important role in the field of orthopedics.

Keywords

Artificial Intelligence, Orthopedics, Current Application Status, Application Prospects, Challenges

Copyright © 2025 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

在人口老龄化不断加剧以及人们生活方式发生改变的背景下，骨科疾病的发病率呈逐步上升趋势，社会对医疗服务的需求也日益增长。人工智能作为一项前沿技术，近年来在医疗领域的应用取得了显著进展，为骨科学的创新发展带来了新的机遇。本文旨在全面且深入地探讨人工智能在骨科学各领域的应用现状、前景以及面临的挑战。

2. 人工智能在骨科学领域的应用现状

2.1. 疾病诊断

2.1.1. 骨折诊断

人工智能在骨折诊断领域已取得了令人瞩目的进展。深度学习算法能够快速且精准地识别影像学检查中的细微骨折，尤其对隐匿性骨折具有较高的敏感度。由于隐匿性骨折的影像表现缺乏典型特征，在传统阅片过程中，经验较少的低年资医师极易出现漏诊或误诊情况。AI 辅助阅片模式下，低年资和高年资医师阅片时间分别从 (547 ± 78) s 和 (476 ± 68) s 缩短至 (353 ± 76) s 和 (305 ± 67) s。而 AI 辅助阅片系统借助深度学习技术，可自动识别和标记微小的骨折特征，有效弥补了人工阅片的不足，助力医生发现那些不易察觉的骨折[1]。在部分疾病的诊断中，卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)与临床医师的诊断准确率相差无几，但临床医师在 CNN 的辅助下，诊断效率能够得到大幅提高[2]。推想医疗科技研发的 InferRead DR Chest 系统，通过对胸部 X 射线图像进行智能分析，可实现病灶的快速筛查与预警，精准量化辅助诊断并自动生成结构化报告[3]。AI 辅助下的骨折诊断还可应用于因各种原因导致的骨质疏松人群的全身骨折筛查。此外，AI 能够将二维影像转化为三维模型，帮助医生评估复杂骨折(如骨盆粉碎性骨折)的空间关系，为术前规划提供更精确的依据。同时，AI 系统通过持续学习罕见病例，可不断提升自身诊断能力，进一步降低误诊或漏诊的概率。

2.1.2. 脊柱疾病诊断

AI 在脊柱侧弯、椎间盘突出和腰椎滑脱等脊柱疾病的诊断中也发挥着重要作用。深度学习(Deep

Learning, DL)模型能够自动标记 MRI 或 CT 中的椎间盘突出、椎管狭窄位置,且准确率较高。基于脊柱各种成像技术的 DL 算法已被广泛应用于多种脊柱疾病的诊断,包括脊柱肿瘤、脊柱感染、脊柱骨质疏松、脊柱侧弯畸形、脊柱骨折、脊柱退行性疾病等[4]。例如,全标准卷积网络(Full-standard Convolutional Network, FCN)模型通过对脊柱影像的分析,可自动识别脊柱的解剖结构并计算相关参数,其敏感度超过传统放射科医师。AI 在青少年特发性脊柱侧弯(Adolescent Idiopathic Scoliosis, AIS)诊断中具有独特优势, Sun 等研发了一种基于深度学习关键点检测的特发性脊柱侧凸 Cobb 角自动测量方法,并与人工测量方法进行对比。结果显示,当 Cobb 角不超过 90°时,自动测量结果与专家标注一致,可靠性极高。该技术还能在短时间内同时定位同一脊柱侧凸病例的多个侧弯[5]。

2.1.3. 关节疾病诊断

AI 在关节疾病诊断方面的应用也取得了一定成果。AI 可自动检测关节间隙、骨赘形成,并完成 Kellgren-Lawrence 分级,同时通过 MRI 检查测量软骨厚度,用于预测 OA 进展风险。赵晓阳等[6]研究了利用 X 线影像在公共人工智能平台上训练模型对膝关节骨性关节炎(knee osteoarthritis, KOA)严重程度进行自动分期的可行性,并与放射科医师的诊断结果对比,发现模型效能达到甚至超过了高年资放射科医师的测试水平。这表明基于公共人工智能平台进行模型训练,利用 X 线影像进行 KOA 的自动 KL 分期具有可行性和一定优越性。Wu [7]等采用径向基神经网络分类方法,对 46 个膝关节 MR 图像进行检查,其早期诊断 KOA 的准确率达到 75%,其中训练集和正常膝关节的准确率为 100% [7]。另外, AI 还可通过超声或核磁中的滑膜血流型检测类风湿性关节炎(Rheumatoid Arthritis, RA)的滑膜增生与各个关节的骨质侵蚀,辅助诊断 RA 的活动性,为临床治疗提供指导。

2.1.4. 运动损伤诊断

无论是专业运动员还是普通运动爱好者,都有可能遭遇运动损伤。有研究利用 CNN 开发的膝关节 MRI 辅助诊断系统,能够更精准地辨别包括 OA、前交叉韧带撕裂以及半月板撕裂在内的异常表现,其诊断水平相当于普通放射科医师[8]。通过对膝关节 MRI 的深度学习分析, AI 可识别韧带纤维走向异常,区分部分撕裂与完全断裂;还可用于诊断隐匿性韧带损伤,如检测 PCL 后交叉韧带的“幽灵征”(ghost sign)及踝关节外侧韧带群的微小损伤,减少漏诊情况。在肩袖损伤诊断中, AI 可自动划分部分或全层撕裂,为关节镜手术规划提供辅助。

2.1.5. 骨质疏松症诊断

AI 能够通过分析影像学图像或患者的临床数据,预测骨质疏松症的发生风险和骨折风险。有研究对比了 2 种代表性的人工智能模型在原发性骨质疏松症诊疗指南解读和临床实例验证中的表现,以观察它们在临床实际工作中的应用价值。结果显示,这两种模型都能通过高效的信息整合提升骨质疏松症的诊疗效率,且人工智能模型解读结果与临床骨密度检查的实际诊断报告基本吻合。其中, Deep Seek 在准确性和临床应用性上比 Chat GPT 更具优势,而在全面性和可解释性方面两者无统计学差异。通过临床实例验证发现,相较于 Chat GPT 的基础性诊疗框架, Deep Seek 展现出更为完整的指南依从性和临床适用性。这种系统性、全周期的疾病管理框架,有助于提高骨科医师临床决策的精准性和效率,从而优化骨质疏松症患者的长期治疗效果。因此, AI 能够辅助医师诊治骨质疏松症,提升临床效率和决策质量[9]。

2.2. 手术治疗

2.2.1. 手术规划及术中导航

AI 技术不仅能依据患者的影像学数据和临床信息,制定个性化的手术方案,还能集成到手术导航系统中,提供实时图像,并在实时图像的指导下,帮助医生在手术过程中实现更精确地定位和操作。

手术辅助机器人系统如达芬奇(Da Vinci)机器人,在腰椎手术中得到广泛应用。根据患者的术前影像数据,人工智能算法能够通过骨密度、椎弓根形态和神经走行等精确规划最优的手术路径,并在手术过程中实现动态调整,有效提高了腰椎手术的置钉准确性,力求达到最佳手术效果[10]。

机器人辅助导航下精准置钉在中青年股骨颈骨折内固定治疗中,能显著提高手术操作精准度,降低手术难度,缩短手术时间及术中透视次数。比较患者前倾角偏离度、颈干角偏离度及术后缩短程度综合对比,机器人辅助导航手术组均优于传统手术组,且差异有统计学意义($Z = 2.229, P = 0.026$),该技术在临床中已较为成熟且效果显著,具备进一步推广的价值[11]。同时,机器人辅助导航下置钉可明显减小手术伤口,便于患者术后护理及术后功能锻炼,显著提高患者依从性,有利于患者术后康复。王磊[12]等人采用 TiRobot 联合 Artis Zeego 系统微创治疗 90 例骨盆骨折患者,通过绘制手术学习曲线发现:骶髂螺钉组、髌白螺钉组、复合螺钉组分别在完成 7、10、11 例手术后进入适应期。随着手术经验的积累,螺钉植入时间有明显下降趋势,但螺钉置入精度的差异无统计学意义,这表明该系统在初学者或熟练使用者操作下均可达到精准置钉的效果。

机器人辅助全踝关节置换术(Total Ankle Arthroplasty, TAA)能在截骨时精确控制切割的角度和深度,避免了传统手术中由于人为因素引起的偏差。精确地切割和假体定位减少了假体松动、关节不稳定等术后并发症的发生。此外,机器人可以根据患者解剖结构的特点,依据术前影像数据进行个性化定制,确保每个患者的截骨角度和植入位置都能达到最佳效果[13]。在机器人辅助全膝关节置换术中,机器人组下肢力线偏移和 KSS 功能评分手术前后变化值均优于传统组,差异有统计学意义($P < 0.05$),获得良好的假体位置同时减少术中失血量,实现更精准的术后下肢力线重建,提升早期临床疗效[14]。机器人臂辅助全髋关节置换术(Total Hip Arthroplasty, THA)借助术前髋关节 CT 扫描创建患者特定的模型,外科医生利用该 3D 模型规划最佳骨切除和假体位置,以实现所需的骨覆盖、旋转中心、组合偏移和下肢长度校正[15]。在骨折手术中,机械臂可自动调整钢板弯曲度,推荐合适长度的螺钉,并很好地完成螺钉的路径规划。Wang[16]等的研究结果表明,机器人辅助经皮螺钉固定治疗舟骨骨折具有良好的临床效果。该方法避免了骨科医生对复位质量和植入物放置的不确定性,减少了软组织损伤、手术时间、学习曲线和潜在并发症。研究初步验证了机器人辅助手术在治疗舟骨骨折中的可行性和优势,为后续的微创和精确治疗提供了思路。

2.2.2. 术后风险预测

机器学习(ML)在骨科术后的风险预测方面具有一定优势。例如,骨质疏松性椎体压缩性骨折患者行经皮椎体成形术后,骨水泥渗漏可能造成严重并发症,如骨水泥外渗到硬膜外或椎间孔会压迫脊髓和神经根,增加邻近椎体骨折的风险,甚至导致截瘫。Li [17]等人回顾性研究了 385 例骨质疏松性椎体压缩性骨折(Osteoporotic Vertebral Compression Fracture, OVCF)行单侧入路经皮椎体成形术(Percutaneous Vertebroplasty, PVP)的患者,发现年龄、体重指数和骨密度等术前变量是骨水泥渗漏的重要预测指标,并构建了 PVP 术后骨水泥的渗漏模型,这有助于在术前计算风险变量,为患者提供个性化的手术治疗。丁宇[18]等人构建的基于人工智能的髋关节置换术后血栓风险预测模型,可用于髋关节置换术患者术后 DVT 和 PE 发生风险评估,为临床工作中高风险患者的早期识别和干预提供指导,从而有效提高患者围手术期安全性。

2.3. 康复治疗

2.3.1. 康复评估

AI 技术可用于评估患者的康复情况。通过分析患者的运动数据和生理数据,AI 能够客观地评估患者的康复进度,为康复治疗提供可靠依据。例如,通过动作捕捉系统量化术后活动轨迹,识别异常步态,

进而评估术后恢复状况。

2.3.2. 康复训练

AI 驱动的康复机器人能够为患者提供个性化的康复训练方案。这些机器人可以根据患者的康复情况自动调整训练强度和难度,从而提高康复效果。比如,颈椎病患者可通过 VR 完成“摘苹果”训练(强制多方向活动);在膝关节置换术后的功能锻炼中,机器人能根据患者的疼痛反馈和肿胀程度自动调节活动范围,确定功能锻炼每日递增角度。

2.3.3. 疗效预测

机器学习(Machine Learning, ML)已被广泛用于预测与各种疾病相关的并发症。有人开发了基于 ML 的分类器,采用堆叠集成策略来预测诊断为退行性颈椎病(DCM)患者的术后轴痛(PAP)强度。该集成分类器有效地预测了 DCM 患者的 PAP 强度,显示出帮助临床医生管理 DCM 病例同时优化医疗资源利用的巨大潜力[19]。

2.4. 教育与培训

2.4.1. 医学生教育

目前, AI 在医学教育领域的应用尚显缺乏,虽然已经开展了初步的探索尝试,但大规模、系统化的人工智能应用尚未普及[20]。生成式 AI 能够帮助制作教学材料,如创建虚拟病例、模拟真实的临床情景,协助医学生和住院医师提高临床思维和决策能力。例如,英国“Resource Medical”公司[21]开发的 AI 聊天机器人,利用虚拟患者、增强现实模拟等提供真实临床场景,且不会危及患者安全;同时借助移动和在线学习补充学生知识,促进交流。此外, AI 还可利用其强大的分析能力,处理医学文献与指南,动态生成学科知识网络,解答复杂临床问题。

2.4.2. 医生培训

AI 可以作为互动学习工具,助力医生提高手术技能和临床决策能力。有人[22]开发了一种用于微创骨科手术训练的增强现实(Virtual Reality, VR)模拟框架,以填补微创手术(MIS)技能发展资源的空白,并展示了这种方法的有效性。通过将 AR 技术与手术训练相结合,该框架旨在提高手术精度,减少医源性损伤的风险,并为手术训练提供一种低成本、可重复的模拟环境。

3. 人工智能在骨科学领域的应用前景

AI 具备快速处理大量影像学数据和临床数据的能力,能够减少人为因素导致的误诊和漏诊情况。随着技术的不断进步, AI 在骨科疾病诊断准确性方面有望得到进一步提高。

AI 可以根据患者的个体特征和疾病情况,制定出更加精准的治疗方案,这将有助于提高治疗效果,降低并发症的发生概率。

AI 技术能够通过互联网为偏远地区或基层医疗机构提供诊断和治疗支持,促进医疗资源的均衡分配,让更多患者享受到优质的医疗服务。北京积水潭医院[23]基于 5G 网络完成了 48 例远程机器人辅助胸腰椎骨折复位及内固定手术,实现了良好的手术效果,证明基于 5G 网络的远程机器人辅助手术是安全有效的。

AI 可以对大量的临床数据和影像学数据进行深入分析,预测骨科疾病的发病风险和进展趋势,为骨科疾病的早期干预和预防提供有力支持。

目前,新型生成式人工智能(Generative Artificial Intelligence, Gen AI)作为一类基于深度学习的模型,能够学习大量数据分布并生成具有高度一致性的新数据,已在图像生成、自然语言处理等多个领域取得

突破性进展[24]。将 Gen AI 与骨科手术机器人相结合，可智能支持从术前影像建模与个性化手术路径规划，到术中自主导航与风险预测，再到术后康复干预与进展评估的全部流程，实现从骨科机器人的“精准操作”向 Gen AI 的“智慧决策”演化。

未来，结合临床生物力学开发符合人体生理特点和临床需求的骨科诊疗规范，正逐渐成为智能骨科的发展重点[25]。

4. 面临的挑战

4.1. 数据隐私和伦理

AI 技术的应用需要处理大量的患者数据，因此数据隐私和安全问题至关重要。在使用临床数据进行 AI 决策时，必须严格遵守数据保护法规，切实维护患者隐私。同时，要认识到隐私保护与创新之间存在权衡关系，过度保护会阻碍数据驱动的创新，而保护不足则会危害患者隐私[26]。此外，AI 在医疗决策中的使用可能引发关于责任、透明度和患者自主权等方面的伦理和法律问题，需要进一步深入研究。

4.2. 算法的可解释性

深度学习算法通常被视为“黑盒”，其决策过程难以解释[21]。而在医疗领域，算法的可解释性至关重要，因此需要开发更具透明度的算法，以增强医疗决策的可信度。

4.3. 缺乏统一的行业标准

2023 年国家药品监督管理局制定了 YY/T 1901《采用机器人技术的骨科手术导航设备要求及试验方法》[27]，并于 2024 年 9 月 15 日正式实施。但在该标准发布之前，市面上已有多种骨科手术导航设备投入临床使用，这些产品在性能及操作方式上存在不统一的问题，导致产品从设计研发到上市、监管各个环节都处于无标准可依的状态[28]。

4.4. 使用成本高昂

受高昂的产品价格和耗材成本影响，国内进口一台达芬奇手术机器人的价格是美国本土价格的八倍，且机器人手术价格比普通手术高出 2~4 万元，同时国内大部分城市尚未将机器人手术纳入医保范畴[29]。

5. 结论

人工智能在骨科学领域的应用前景十分广阔，有望极大地提升医疗服务的质量和效率。然而，随着技术的不断发展，我们也需要高度关注并解决随之而来的一系列挑战和限制，确保技术能够得到负责任且安全地使用。未来，随着技术的持续进步，如 AI 算法的可解释性进一步加强、其行业标准和法律法规进一步完善或机器人手术纳入医保报销范畴降低使用成本，人工智能必将在骨科学领域发挥更大的作用，为骨科疾病的诊疗带来更多变革。

基金项目

陕西省科技厅科技创新团队项目(编号：2024RS-CXTD-86)。

参考文献

- [1] 李三保, 王山林, 杜利娟, 李梓嫣, 单爱国. 人工智能辅助不同年资医师对隐匿性肋骨骨折诊断价值的应用研究[J]. 实用医技杂志, 2025, 32(4): 260-264.
- [2] Olczak, J., Fahlberg, N., Maki, A., Razavian, A.S., Jilert, A., Stark, A., *et al.* (2017) Artificial Intelligence for Analyzing

- Orthopedic Trauma Radiographs. *Acta Orthopaedica*, **88**, 581-586. <https://doi.org/10.1080/17453674.2017.1344459>
- [3] 李智唯, 刘静, 张俊忠, 魏德健, 曹慧. 深度学习在肋骨骨折辅助诊断中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2025: 1-23.
- [4] 帕哈提·吐逊江, 杨来红, 常玉山, 何雄, 郭辉. 深度学习在脊柱影像及诊疗中的应用进展[J]. 分子影像学杂志, 2023, 46(3): 560-565.
- [5] Sun, Y., Xing, Y., Zhao, Z., Meng, X., Xu, G. and Hai, Y. (2022) Comparison of Manual versus Automated Measurement of Cobb Angle in Idiopathic Scoliosis Based on a Deep Learning Keypoint Detection Technology. *European Spine Journal*, **31**, 1969-1978. <https://doi.org/10.1007/s00586-021-07025-6>
- [6] 赵晓阳, 许树林, 潘为领, 唐慧勇, 张守波. 公共人工智能平台在膝关节骨性关节炎分期中的应用[J]. 实用临床医药杂志, 2022, 26(8): 22-26.
- [7] Wu, Y., Yang, R., Jia, S., Li, Z., Zhou, Z. and Lou, T. (2014) Computer-Aided Diagnosis of Early Knee Osteoarthritis Based on MRI T2 Mapping. *Bio-Medical Materials and Engineering*, **24**, 3379-3388. <https://doi.org/10.3233/bme-141161>
- [8] Bien, N., Rajpurkar, P., Ball, R.L., Irvin, J., Park, A., Jones, E., *et al.* (2018) Deep-Learning-Assisted Diagnosis for Knee Magnetic Resonance Imaging: Development and Retrospective Validation of MRNet. *PLOS Medicine*, **15**, e1002699. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002699>
- [9] 胡朝峰, 郑松涛, 陈瑞强, 李尚福. 两种人工智能模型对于原发性骨质疏松症诊疗指南及临床骨密度检查解读的对比分析[J]. 新医学, 2025, 56(5): 499-507.
- [10] 胡高凯, 牛亚楠, 龚玉康, 胡阳, 徐瑞轩, 高文山. 深度学习在腰椎疾病诊断、手术规划及术后预测中的应用研究进展[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(6): 921-928.
- [11] 张诚诚, 李明, 李忠, 等. 骨科手术机器人辅助导航下精准置钉治疗中青年股骨颈骨折[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(6): 937-941.
- [12] 刘可心, 由梦真, 黄默冉, 等. 天玑骨科机器人联合 Artis Zeego 系统微创治疗骨盆骨折的初步应用研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36(8): 929-933.
- [13] 苑博, 兰岳鹰, 房焱, 董小维, 梁海东. 骨科机器人在足踝外科中的应用进展与展望[J]. 骨科临床与研究杂志, 2025, 10(1): 61-64.
- [14] 孟晨, 徐永清, 施荣茂, 等. 无影像机器人辅助人工全膝关节置换术在膝骨关节炎合并关节外畸形治疗中的早期临床疗效[J]. 中国修复重建外科杂志, 2025, 39(1): 5-12.
- [15] Kayani, B., Konan, S., Ayuob, A., Ayyad, S. and Haddad, F.S. (2019) The Current Role of Robotics in Total Hip Arthroplasty. *EFORT Open Reviews*, **4**, 618-625. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.4.180088>
- [16] Wang, C., Fu, S., Li, X., Wang, J., Wu, C., Zhang, J., *et al.* (2023) Robot-Assisted Percutaneous Screw Fixation in the Treatment of Navicular Fracture. *Frontiers in Surgery*, **9**, Article 1049455. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.1049455>
- [17] Li, W., Wang, J., Liu, W., Xu, C., Li, W., Zhang, K., *et al.* (2021) Machine Learning Applications for the Prediction of Bone Cement Leakage in Percutaneous Vertebroplasty. *Frontiers in Public Health*, **9**, Article 812023. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.812023>
- [18] 丁宇. 基于人工智能的髋关节置换术后血栓风险预测模型构建[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 中国人民解放军海军军医大学, 2024.
- [19] Chu, X., Song, J., Wang, J. and Kang, H. (2025) A Stacking Ensemble Machine Learning Model for Predicting Postoperative Axial Pain Intensity in Patients with Degenerative Cervical Myelopathy. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 9954. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94755-y>
- [20] 王茹, 李毅恒, 孙世仁, 赵晋. 人工智能在医学教育中的应用前景与挑战[J]. 中国医学教育技术, 2025, 39(3): 306-310.
- [21] Mir, M.M., Mir, G.M., Raina, N.T., *et al.* (2023) Application of Artificial Intelligence in Medical Education: Current Scenario and Future Perspectives. *Journal of Advances in Medical Education & Professionalism*, **11**, 133-140.
- [22] Cangelosi, A., Riberi, G., Titolo, P., Salvi, M., Molinari, F., Ulrich, L., *et al.* (2025) Augmented Reality Simulation Framework for Minimally Invasive Orthopedic Surgery. *Computers in Biology and Medicine*, **189**, Article 109943. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.109943>
- [23] 赵经纬, 张琦, 韦祎, 等. 基于 5G 的远程机器人辅助胸腰椎骨折内固定术的临床应用研究[J]. 中国数字医学, 2022, 17(6): 10-14.
- [24] 向李智, 叶哲伟. 生成式人工智能骨科机器人在骨科手术中的应用[J]. 现代实用医学, 2025, 37(6): 551-553.
- [25] 韩晓光, 刘亚军, 范明星, 田伟. 骨科手术机器人技术发展及临床应用[J]. 科技导报, 2017, 35(10): 19-25.

-
- [26] Price, W.N. and Cohen, I.G. (2019) Privacy in the Age of Medical Big Data. *Nature Medicine*, **25**, 37-43.
<https://doi.org/10.1038/s41591-018-0272-7>
- [27] 中国食品药品检定研究院, 国家药品监督管理局医疗器械技术审评中心, 上海市医疗器械检验研究院, 等. YY/T 1901-2023 采用机器人技术的骨科手术导航设备要求及试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [28] 唐桥虹, 孟祥峰, 王浩, 李澍. 行业标准《采用机器人技术的骨科手术导航设备要求及试验方法》解析[J]. 协和医学杂志, 2025, 16(4): 908-915.
- [29] 欧阳安, 霍文磊. 我国手术机器人产业发展现状及对策建议[J]. 中国仪器仪表, 2021(12): 21-25.