

· 骨科专栏 ·

人工智能背景下腰椎间盘突出症诊疗的最新进展

刘子璇,吴天宇(综述),陈伟,张奇*(审校)

(河北医科大学第三医院创伤急救中心,河北石家庄 050051)

[摘要] 腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation,LDH)是全球范围内普遍存在的健康问题,严重影响患者的生活质量。随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的快速发展,AI在医疗领域的应用为LDH的诊疗带来了新的机遇。本研究旨在探讨AI技术在LDH诊疗中的研究进展,并评估其在提高诊断准确性和治疗效率方面的潜力。研究发现AI技术提供了更加全面、客观的诊断支持,显著提高了诊疗的效率。此外,AI技术在LDH的术前模拟、术中辅助和术后预测中的应用,为实现精准医疗提供了新的方向。为此,笔者对相关内容进行综述,为LDH的AI辅助诊疗提供参考。

[关键词] 椎间盘移位;人工智能;机器人 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2025.08.008

[中图分类号] R681.53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1007-3205(2025)08-0916-05

腰痛是全球常见疼痛类型之一,而腰椎间盘突出症是引发腰痛的重要原因^[1-2]。既往研究^[3]显示全球已有6.19亿患者罹患腰椎间盘突出症,截止到2050年将增至8.43亿,患病人口的持续增加造成个人生活质量下降、家庭经济负担加重以及社会医疗资源的巨大压力。由于LDH诊疗多依靠临床医师个人实施全程诊疗,其诊断准确率、治疗康复率等方面因地区发展水平不同存在一定差异。因此,探索一种更具客观性、准确性、高效性、普适性的工具以辅助LDH的诊断及治疗,已成为当前研究的重点方向。近年人工智能技术的快速发展为现代医疗带来新的契机^[4]。在公共卫生领域,新冠肺炎疫情期间制订的智能医学应用专家共识,验证了智能医学在提高工作效率、避免人为错误等方面有极大优势^[5];在临床诊疗领域,机器人辅助下颈椎椎弓根螺钉固定术已制订了临床操作指南,为其适应证和禁忌证等方面提出相关推荐意见^[6];在基础研究领域,冯世庆团队应用机器学习技术发现冯世庆团队应用机械学习技术发现椎间盘退行性变严重程度与多程序性细胞死亡的相关基因模块具有高度相关性,为椎间盘退行性变的分子病理学机制提供了新见解,为其治疗提供了新策略^[7]。AI因其特有的客观性、精确性、全面性在医疗领域中发挥了重要的作用。

鉴于以上AI技术的发展,人工智能在腰椎间盘突出症诊疗中具有更加全面、客观和准确的优势^[8-10]。本文引用了2014—2024年的人工智能与腰间盘突出症相关的文章,通过详细梳理人工智能技术在腰椎间盘突出症诊疗中的应用情况,笔者阐述了腰间盘突出症的人工智能诊断与治疗的研究进展,以期为临床实践提供新思路与参考依据。

1 人工智能在LDH影像学诊断的应用

1.1 LDH的影像学诊断标准 LDH诊断包括临床体征与影像学检查^[11],临床症状表现为腰部及下肢疼痛麻木,严重者可出现马尾综合征;影像学检查则包括数字化X射线(digital radiography, DR)、计算机断层扫描(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)。X线主要显示椎间隙改变、椎体边缘增生与椎间盘钙化等退行性病变。CT对钙化的突出椎间盘组织显示较好,对严重的LDH患者具有诊断价值。MRI通过T2加权图像的强弱信号清晰的看到髓核的突出与神经的移位,适合评估椎间盘、神经根受压等软组织病变以及鉴别椎管内其他占位性病变,对于腰椎间盘突出症的诊断有极大帮助^[12]。MRI因其高分辨率和无辐射性成为腰椎间盘突出症的首选诊断方式。

1.2 卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)在LDH诊断中的应用

1.2.1 CNN定义 CNN是人工智能中的一种深度学习模型,其原理为自动提取图像特征进行分类、分割和检测,将以上视觉数据进行处理^[13]。因其具有自动提取功能、数据平移不变性与参数共享等特征,

[收稿日期]2024-11-28

[基金项目]河北省重点研发计划项目(21377731D)

[作者简介]刘子璇(2000-),男,河北任丘人,河北医科大学第三医院医学硕士研究生,从事骨折愈合机制研究。

*通信作者。E-mail:18001666@hebm.u.edu.cn

在医疗影像分析等领域发挥了重要作用。有研究^[14]表示,轻量级 CNN 模型对肺癌细胞亚型的分类有极高的准确率。而其他深度学习模型如递归神经网络、生成对抗网络等模型多应用于自然语言处理等方面,在医疗卫生方面研究较为缺乏,故笔者仅针对 CNN 进行系统论述。

1.2.2 CNN 在 LDH 诊断的历史进展 Jamaludin 等^[15]和 Zhou 等^[16]利用 CNN 在小样本量的腰椎 MRI 图像中应用自动诊断 LDH,分别达到了 95.6%和 98.6%的诊断准确率,验证了 AI 自动诊断方法的可行性。Lewandrowsk 等^[17]开发的智能系统在 3 650 例 LDH 病例中诊断准确率达 81%,显著优于人工操作的 66%,证明了 AI 系统在大样本模型中仍具有优势。Lehnen 等^[18]扩展了 AI 在腰椎退行性病变诊断中的应用,证明了其在准确区分不同类型病变及神经压迫情况方面的有效性,展示了 AI 在该领域更广泛的应用潜力。上述研究结果证明了,基于 CNN 的 AI 技术在腰椎间盘突出症的诊断中具有高度的准确性和可行性,为未来该领域的自动化诊断和治疗方法的发展提供了坚实的基础。

1.2.3 CNN 联合多技术诊断 LDH 近年来腰椎间盘突出症的 CNN 诊断模型引入了计算机视觉、计算机辅助诊断和决策支持系统等新技术,为自动化诊断提供了新的方法。Zheng 等^[19]将多模块结合系统应用于 CNN 模型使其对 LDH 诊断更高效、更准确。Hou 等^[20]将诊断分类器与计算机视觉技术相结合,使 LDH 各区域退行性病变的严重程度以热图的方式显示出来,为医生与患者提供了更直观的诊断证据。Qian 等^[21]基于 U-net 系统构建的模型能够更高效、全面地识别椎间盘组织的形态和轮廓,从而精准地自动诊断 LDH。Zhang 等^[22-23]结合自动临床支持系统以辅助医生更全面地评估疾病情况、更准确地选择治疗方案。综上所述,通过计算机视觉、辅助决策系统等新技术,AI 模型在 LDH 的诊断准确性和效率方面取得了显著进展,为实现自动化、精准化诊断提供了广阔前景。

1.2.4 CNN 的优势及局限性 CNN 智能模型通过自动特征提取系统、高效的特征学习能力、良好的泛化能力在 LDH 的智能诊断方面具有诸多优势,可以减少医生工作量与主观性,提升诊断准确性。未来 CNN 模型有望与多模态数据融合技术相结合,在实时诊断应用、个性化医疗等方面取得突破性进展。同时 LDH 智能诊断研究因受限于无大规模数据集的训练与测试,使得 AI 模型的诊断准确率并不稳定。为此 Sustersic 等^[24]开发了迁移学习方法,将源任务通过 CNN 预训练提取图像特征,而后

将图像特征进行调整与空间映射以更好地适配联合目标任务的训练。通过源任务与目标任务的结合有效的解决了训练数据集的规模问题,实现了 LDH 诊断的效率与准确率的提高。

2 人工智能在 LDH 治疗的应用

2.1 LDH 的治疗方法 LDH 的治疗方案包括保守治疗与手术治疗。非手术治疗适用于青年患者、初次发作患者、症状在 3 个月内自行缓解且影像学检查无明显椎管狭窄的患者。手术治疗则适用于症状持续 3 个月不能缓解的患者、合并马尾综合征或椎管狭窄等手术适应症的患者^[11]。LDH 手术治疗主要包括后路椎间盘镜、椎间孔内镜等微创治疗和椎体内固定融合术,前者具有较小的切口和较少的组织损伤,但视野和操作空间受限导致手术时间延长和手术效果不理想,后者属于侵入性手术方式,涉及较大的手术切口和更多的软组织损伤,导致患者术后恢复时间较长,且术后疼痛较为显著^[25-26]。人工智能辅助可以有效的改善以上 LDH 手术治疗的局限。

2.2 人工智能在 LDH 术前准备的应用

2.2.1 多模态数据融合技术的定义 多模态数据融合是指将来自不同模态的数据,例如文本、图像、音频、传感器等数据进行综合处理和分析,以获得更全面、准确、可靠的信息。在腰椎间盘突出症的诊疗中,不同医学影像模态(如 MRI、CT)数据具有各自的特点和优势。MRI 对软组织的分辨率高,能清晰显示椎间盘、脊髓等结构;CT 则对骨骼结构的显示更为清晰。将以上不同模态的数据进行整合,可获得更全面丰富的信息,以提高诊断的准确性和治疗的有效性。

2.2.2 多模态数据融合技术的应用进展 AI 术前模拟应用多模态数据融合技术,可辅助设计手术优势路径,预测手术难度为术者提供临床参考。Zhu 等^[27]开发基于人工智能 MR 图像分割方法构建了腰骶部 3D 模型,证实了 L5/S1 节段术前经皮内镜下腰椎间盘切除术模拟入路的可行性。Shan 等^[28]建立的个体化预测模型,预测了经皮内镜下腰椎间盘切除术(percutaneous endoscopic lumbar discectomy, PELD)术后再次手术的风险因素且准确性达 88.9%。Fan 等^[29]采用深度学习技术实现了 CT 图像腰骶部结构语义分割并模拟椎间孔成形术成功预测了手术难度。上述研究证明 AI 术前模拟技术在 LDH 的治疗中展示了更高的准确性和效率,提供了智能治疗的新方向。

2.2.3 多模态数据融合技术的优势与局限性 多

模态数据融合技术可以全面获取信息,提高手术成功率,减少患者痛苦和恢复时间。为个性化医疗方案提供丰富依据,并可以提升治疗效果。其技术不断进步预示着可进行更精准地融合和分析以辅助手术治疗环节,推动 LDH 治疗向智能化、个性化方向发展。同时多模态数据融合技术在实际应用中仍面临挑战,其数据质量与兼容性难以保证、时效性要求不易满足、数据特征选择困难等方面仍待提高。但有研究表示可通过数据预处理、优化特征提取、改良模型等措施以克服以上困难^[30]。

2.3 人工智能在 LDH 术中治疗的应用

2.3.1 智能机器人辅助技术简介 智能辅助机器人包括机械结构(高精度机械臂、末端执行器);传感器系统(位置传感器、视觉传感器、力传感器);控制系统(运动控制系统、数据处理模块、人机交互界面)等结构。通过上述系统,智能辅助机器人可在 LDH 的治疗过程中结合医学影像数据和人工智能算法为医生提供更精确、高效和安全的操作支持。

2.3.2 智能机器人辅助技术 提高手术安全性的应用 智能辅助机器人基于计算机模拟技术分析患者的影像学数据,识别临床风险并优化手术方案。Jin 等^[31]研究表明,机器人辅助下的经皮内镜下腰椎间盘突出切除术可提供精确手术位点和最佳穿刺轨迹,有效降低了翻修手术概率;有学者^[32-33]通过对接受椎间孔镜脊柱微创技术和经皮内镜椎间孔入路椎间盘切除术治疗的患者进行回顾性分析,发现机器人辅助在穿刺次数、透视次数、手术时间和术中焦虑评分方面均优于传统人工操作。Lee 等^[34]发现经机器人辅助短节段腰椎融合术后,患者的术后并发症较传统方式显著下降,为手术效果评估提供了参考。Wang 等^[35]通过比较机器人辅助 PELD 和传统 PELD,发现前者术中失血量和荧光透视频率远低于后者,从而降低患者与医生的放射暴露风险。上述研究表明智能辅助机器人在减轻患者痛苦和组织损伤方面具有显著效果。

2.3.3 智能机器人辅助技术 提高手术精确性的应用 骨科智能辅助机器人通过其视觉显示系统,智能规划系统,智慧导航系统在术中辅助临床医师提高手术精确度,减少手术并发症。Agyei 等^[36]和 Zhang 等^[37]均使用智能机器人辅助系统引导椎弓根螺钉置入皮质骨,降低了螺钉错位的风险;Fan 等^[38]开发基于多模态图像融合技术的系统可规划入路、辅助导航,提高手术精确性,降低了血管和神经损伤事件发生。Cui 等^[39]开发的基于 CNN 的计算机辅助检测系统在经皮椎间孔镜技术手术中可准确识别神经和硬脑膜图像,提高了医生对组织的识

别能力,降低了误伤神经的风险。综上所述,骨科智能辅助机器人在提高医师临床技能水平、减少患者并发症方面具有显著优势。

2.3.4 智能机器人辅助技术的优势与局限性 骨科辅助机器人可极大地提高手术的精确度和安全性^[40],尤其在微创手术和复杂椎体内固定融合术中发挥了关键作用。外科医生通过机器人辅助可以在狭小空间内完成精确操作,减少手术创伤,并保护邻近节段,改善患者的治疗效果的同时,还推动了手术向更加精准化、微创化的方向发展。有研究表明未来人机协作技术愈发成熟可以有效降低医疗成本、推动远程医疗技术的发展^[41]。同时智能机器人辅助技术在全面推广中仍具有诸多困难。技术层面:其精确性与稳定性高度依赖复杂系统更新维护成本高;临床应用层面:其缺乏临床经验与判断力并受患者接受度的影响;医学伦理层面:其存在责任界定问题与资源公平性问题等。在未来发展中需不断克服以上问题和挑战,以便更好地应用智能机器人辅助技术。

2.4 人工智能在 LDH 术后治疗的应用

2.4.1 人工智能模拟技术的定义 人工智能模拟技术是指利用 AI 算法和模型,对特定的系统、过程或现象进行模拟和仿真的技术手段。在 LDH 的术后应用中,人工智能模拟技术可结合大量的医学数据(影像学资料、生理指标等),建立智能模型以预测疾病治疗效果。

2.4.2 人工智能模拟技术的研究进展 人工智能模拟技术可以精准的预测椎间盘突出症患者的术后情况,为临床医师在患者围术期内提供个体化、精细化的诊疗方案。Staartjes 等^[42]和 Saravi 等^[43]建立了预测患者术后结局的深度学习模型其平均准确率为 82.4% 与 91.3%。Chen 等^[44]和 Berg 等^[45]建立智能模型预测手术方法,验证术后残疾和疼痛等结局,以制定更完善的术后治疗方案。鲍军平等^[46]探讨了梯度提升机模型预测 PELD 治疗 LDH 近期疗效的结局,发现其预测效能优于传统多因素 Logistic 回归分析模型。Harada 等^[47]利用机器学习分析开发临床工具预测腰椎间盘突出术后复发的情况,提供相关影响因素以辅助识别再发髓核突出的风险。上述研究表明了人工智能模拟技术可以精准预测术后情况,有助于提升患者的就医体验和治疗依从性,加速患者的康复进程。

2.4.3 人工智能模拟技术的优势与展望 人工智能模拟技术面临数据质量、特征选择等方面的挑战。但其对疾病发展的精准预测及个体化治疗方案的制订具有显著优势,可提高医疗效率和资源利用。人

人工智能模拟技术与多模态数据融合技术深度结合与多模态数据融合技术深度结合,有望进一步分析发病机制等研究性问题;与生成对抗网络相结合则可提高模拟的真实性;与现实增强技术结合可为医疗提供更直观的体验^[48]。

3 总结与展望

本文系统阐述了人工智能技术在腰椎间盘突出症诊断与治疗中的最新进展。从 CNN 与计算机视觉技术、计算机辅助诊断和决策支持系统结合的角度,总结了人工智能系统辅助腰椎间盘突出症诊断中的应用,并依据阶梯性治疗原则,论述了人工智能系统的术前模拟、术中辅助及术后预测的最新进展。然而,本文也存在一定局限性。目前人工智能在腰椎间盘突出症诊断主要依赖 MRI,对于其他影像学方法如 CT、DR 以及电生理检查的智能诊断研究相对较少。此外,部分机器人辅助治疗的研究为单病例报告,缺乏大规模、多中心的临床验证,限制了其普遍性和广泛应用的前景。

近年来人工智能技术不断发展,医疗领域对精准化、个体化治疗理念也随之深入,更多适用于医疗行业的人工智能系统进入临床。大数据推动了人工智能系统相关数据集规模日益庞大,数据分析能力更加精准。尤其对于腰椎间盘突出症诊疗,人工智能有望实现从病因鉴别诊断、治疗方案抉择、术前智能预测、术中智慧辅助、术后精准护理的全方位协同辅助。从而在提升医疗工作效率,降低误诊率和漏诊率中展现出巨大的应用潜力。

[参考文献]

[1] Hartvigsen J, Hancock MJ, Kongsted A, et al. Lancet low back pain series working group. What low back pain is and why we need to pay attention[J]. *Lancet*, 2018, 391(10137): 2356-2367.

[2] Zhang AS, Xu A, Ansari K, et al. Lumbar disc herniation: Diagnosis and management[J]. *Am J Med*, 2023, 136(7): 645-651.

[3] GBD 2021 Low Back Pain Collaborators. Global, regional, and national burden of low back pain, 1990–2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: A systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021 [J]. *Lancet Rheumatol*, 2023, 5(6): e316-e329.

[4] Hadley TD, Pettit RW, Malik T, et al. Artificial intelligence in global health -A framework and strategy for adoption and sustainability[J]. *Int J MCH AIDS*, 2020, 9(1): 121-127.

[5] 陆林, 张加尧, 谢卯, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情防控期间智能医学专家共识[J]. *中华实验外科杂志*, 2020, 37(2): 393-398.

[6] 都金鹏, 陈伯华, 程黎明, 等. 导航和机器人辅助下颈椎椎弓根螺钉固定手术操作指南(2024版)[J]. *中华创伤杂志*, 2024,

40(4): 298-309.

[7] Lv Y, Du J, Xiong H, et al. Machine learning-based analysis of programmed cell death types and key genes in intervertebral disc degeneration[J]. *Apoptosis*, 2025, 30(1/2): 250-266.

[8] Sun S, Tan ET, Mintz DN, et al. Evaluation of deep learning reconstructed high resolution 3D lumbar spine MRI[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(9): 6167-6177.

[9] Pan J, Yu D, Li R, et al. Multi-modality guidance based surgical navigation for percutaneous endoscopic transformational discectomy[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2021, 212: 106460.

[10] Pedersen CF, Andersen MØ, Carreon LY, et al. Applied machine learning for spine surgeons: Predicting outcome for patients undergoing treatment for lumbar disc herniation using PRO data[J]. *Global Spine J*, 2022, 12(5): 866-876.

[11] 中华医学会骨科学分会脊柱外科学组, 中华医学会骨科学分会骨科康复学组. 腰椎间盘突出症诊疗指南[J]. *中华骨科杂志*, 2020, 40(8): 477-487.

[12] Miranda IH, Raymundo JLP, Klein KM. Sensitivity of laségue sign and slump test in hernia and disc bulging diagnoses compared with magnetic resonance imaging[J]. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo)*, 2021, 56(6): 761-765.

[13] 刘开华, 田岚, 李镡, 等. 基于八度卷积神经网络的多标签胸部 X 光图像分类算法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2023, 56(4): 381-390.

[14] Germain A, Sabol A, Chavali A, et al. Machine learning enabled classification of lung cancer cell lines co-cultured with fibroblasts with lightweight convolutional neural network for initial diagnosis[J]. *J Biomed Sci*, 2024, 31(1): 84.

[15] Jamaludin A, Lootus M, Kadir T, et al. ISSLS PRIZE IN BIOENGINEERING SCIENCE 2017: Automation of reading of radiological features from magnetic resonance images (MRIs) of the lumbar spine without human intervention is comparable with an expert radiologist[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(5): 1374-1383.

[16] Zhou Y, Liu Y, Chen Q, et al. Automatic lumbar MRI detection and identification based on deep learning[J]. *J Digit Imaging*, 2019, 32(3): 513-520.

[17] Lewandrowsk IKU, Muraleedharan N, Eddy SA, et al. Feasibility of deep learning algorithms for reporting in routine spine magnetic resonance imaging[J]. *Int J Spine Surg*, 2020, 14(s3): s86-s97.

[18] Lehnen NC, Haase R, Faber J, et al. Detection of degenerative changes on MR images of the lumbar spine with a convolutional neural network: A feasibility study [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(5): 902.

[19] Zheng HD, Sun YL, Kong DW, et al. Deep learning-based high-accuracy quantitation for lumbar intervertebral disc degeneration from MRI[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 841.

[20] Hou C, Li X, Wang H, et al. An MRI image automatic diagnosis model for lumbar disc herniation using semi-supervised learning [J]. *Complex Intell Syst*, 2023, 9(5): 5567-5584.

[21] Qian J, Su GH, Shu XL, et al. Lumbar disc herniation diagnosis using deep learning on MRI[J]. *J Radiat Res Appl*

- Sci,2024,17(3):100988.
- [22] Zhang W, Chen Z, Su Z, et al. Deep learning-based detection and classification of lumbar disc herniation on magnetic resonance images[J]. *J OR Spine*,2023,6(3):e1276.
- [23] Zhang D, Du J, Shi J, et al. A fully automatic MRI-guided decision support system for lumbar disc herniation using machine learning[J]. *JOR Spine*,2024,7(2):e1342.
- [24] Sustersic T, Rankovic V, Milovanovic V, et al. A deep learning model for automatic detection and classification of disc herniation in magnetic resonance images [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*,2022,26(12):6036-6046.
- [25] Kreiner DS, Hwang SW, Easa JE, et al. An evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of lumbar disc herniation with radiculopathy[J]. *Spine J*,2014,14(1):180-191.
- [26] La Rocca G, Galieri G, Mazzucchi E, et al. The three-step approach for lumbar disk herniation with anatomical insights tailored for the next generation of young spine surgeons[J]. *J Clin Med*,2024,13(12):3571.
- [27] Zhu Z, Liu E, Su Z, et al. Three-dimensional lumbosacral reconstruction by an artificial intelligence-based automated MR image segmentation for selecting the approach of percutaneous endoscopic lumbar discectomy [J]. *Pain Physician*,2024,27(2):e245-e254.
- [28] Shan ZM, Ren XS, Shi H, et al. Machine learning prediction model and risk factor analysis of reoperation in recurrent lumbar disc herniation patients after percutaneous endoscopic lumbar discectomy[J]. *Global Spine J*,2024,14(8):2240-2251.
- [29] Fan G, Liu H, Wang D, et al. Deep learning-based lumbosacral reconstruction for difficulty prediction of percutaneous endoscopic transforaminal discectomy at L5/S1 level:A retrospective cohort study[J]. *Int J Surg*,2020,82:162-169.
- [30] Fei Y, Zhan B, Hong M, et al. Deep learning-based multi-modal computing with feature disentanglement for MRI image synthesis[J]. *Med Phys*,2021,48(7):3778-3789.
- [31] Jin M, Lei L, Li F, et al. Does robot navigation and intraoperative computed tomography guidance help with percutaneous endoscopic lumbar discectomy? A Match-paired study[J]. *World Neurosurg*,2021,147:e459-e467.
- [32] 杨蕙铭,韩丹,段小超,等. 2D透视引导机器人辅助 TESSYS 手术治疗腰椎间盘突出症[J]. *中华骨科杂志*,2022,42(1):9-17.
- [33] 王含,刘亚军,范明星,等. 机器人辅助经皮内镜下腰椎间盘切除术的初步疗效报告[J]. *中华骨科杂志*,2022,42(2):84-92.
- [34] Lee NL, Lombardi JM, Boddapati V, et al. Lehman, clinical and patient-reported outcomes after robot-assisted short-segment lumbar fusion with a minimum 1-year follow-up[J]. *Interdiscip Neurosur*,2021,25:101168.
- [35] Wang Z, Tan Y, Fu K, et al. Minimally invasive trans-superior articular process percutaneous endoscopic lumbar discectomy with robot assistance[J]. *BMC Musculoskelet Disord*,2022,23(1):1144.
- [36] Agyei JO, Khan A, Jowdy PK, et al. Robot-assisted cortical bone trajectory insertion of pedicle screws; 2-dimensional operative video[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*,2020,18(5):e171.
- [37] Zhang J, Li W, Hu L, et al. A robotic system for spine surgery positioning and pedicle screw placement[J]. *Int J Med Robot*,2021,17(4):e2262.
- [38] Fan N, Yuan S, Du P, et al. Design of a robot-assisted system for transforaminal percutaneous endoscopic lumbar surgeries: Study protocol[J]. *J Orthop Surg Res*,2020,15(1):479.
- [39] Cui P, Shu T, Lei J, et al. Nerve recognition in percutaneous transforaminal endoscopic discectomy using convolutional neural network[J]. *Med Phys*,2021,48(5):2279-2288.
- [40] Tian W, Liu B, He D, et al. International society for computer assisted orthopaedic surgery. Guidelines for navigation-assisted spine surgery[J]. *Front Med*,2020,14(4):518-527.
- [41] Tian W, Fan M, Zeng C, et al. Telerobotic spinal surgery based on 5G network; The first 12 cases [J]. *Neurospine*,2020,17(1):114-120.
- [42] Staartjes VE, de Wispelaere MP, Vandertop WP, et al. Deep learning-based preoperative predictive analytics for patient-reported outcomes following lumbar discectomy; Feasibility of center-specific modeling[J]. *Spine J*,2019,19(5):853-861.
- [43] Saravi B, Zink A, Ülkümen S, et al. Clinical and radiomics feature-based outcome analysis in lumbar disc herniation surgery[J]. *BMC Musculoskelet Disord*,2023,24(1):791.
- [44] Chen CM, Chen PC, Chen YC, et al. Use artificial neural network to recommend the lumbar spinal endoscopic surgical corridor[J]. *Tzu Chi Med J*,2022,34(4):434-440.
- [45] Berg B, Gorosito MA, Fjeld O, et al. Machine learning models for predicting disability and pain following lumbar disc herniation surgery [J]. *JAMA Netw Open*,2024,7(2):e2355024.
- [46] 鲍军平,刘磊,时睿,等.梯度提升机模型对腰椎间盘突出症经皮内镜切除术近期疗效的预测作用[J]. *中华骨科杂志*,2020,40(19):1327-1336.
- [47] Harada GK, Siyaji ZK, Mallow GM, et al. Artificial intelligence predicts disk re-herniation following lumbar microdiscectomy; Development of the "RAD" risk profile[J]. *Eur Spine J*,2021,30(8):2167-2175.
- [48] Li J, Qi L, Liu N, et al. A new technology using mixed reality surgical navigation with the unlocking closed reduction technique frame to assist pelvic fracture reduction and fixation: Technical note[J]. *Orthop Surg*,2023,15(12):3317-3325.

(本文编辑:刘斯静)