

人工智能在脊柱外科中的应用路径探索：技术革新与临床实践

胡勇, 陈锡炯

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.06.002

【中图分类号】 R681.5 【文献标志码】 C 【文章编号】 1671-0800(2025)06-0554-03

传统脊柱外科手术依赖于手术医师经验,存在主观性强及效率易受影响等问题。近年来,人工智能(artificial intelligence, AI)技术通过数据驱动与算法优化,逐步渗透至脊柱外科的术前、术中和术后全流程,成为提升诊疗质量的核心驱动力。本文结合近年 AI 最新研究成果,从技术应用、临床价值、现存挑战及未来趋势等方面展开述评,以期临床提供参考。

1 AI 在脊柱外科中的核心应用进展

1.1 术前精准诊断与影像分析 影像学检查是脊柱疾病诊断的基石,传统人工阅片易受医师经验与疲劳等因素影响,AI 通过卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)与迁移学习技术,实现了脊柱影像的自动化处理与病理特征提取。

1.1.1 椎体分割与参数测量 深度学习(deep learning, DL)模型在脊柱三维重建与参数计算中表现突出。Huang 等^[1]开发的“Spine Explorer”程序基于腰椎磁共振成像(MRI)实现了椎间盘与椎体的全自动分割,分割精度(Dice 系数 0.953)与人工标注一致性达 98%。2021 年,Cheng 等^[2]提出双阶段密集连接网络,通过高分辨率计算机断层扫描(CT)图像实现了椎体定位误差 $[(1.69 \pm 0.78) \text{ mm}]$ 与形态学参数(椎弓根宽度及椎体旋转角度等)的精准测量,为复杂脊柱畸形(如先天性半椎体畸形)的术前评估提供了新工具。

1.1.2 疾病筛查与分类 AI 在脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)、椎体骨折及椎管狭窄等疾病的筛查中展现出高效性。Galbusera 等^[3]开发的 CNN 模型通过 X 线片自动测算 Cobb 角,预测误差范围为 $2.7^\circ \sim 11.5^\circ$,较人工测量效率提升了 40%。针对骨质疏松性椎体骨折, Rosenberg 等^[4]对比了 ResNet18 与 VGG16 两种模型,发现 ResNet18 在骨折检测灵敏度(90% vs 89%)与特异度(89% vs 83%)上更具优势,尤其适用于基层医疗机构快速筛查。

1.2 智能术前规划与生物力学仿真

1.2.1 三维建模与手术模拟 Aubert 等^[5]利用双平面 X 线片构建脊柱三维模型,自动化测量脊柱-骨盆参数(如腰椎前凸角、骨盆投射角),误差 $< 2.1^\circ$,较传统手工建模效率提升 70%。林泽宇等^[6]开发的智能建模系统支持动态参数调整,可模拟椎弓根螺钉置入后的应力分布,辅助医师优化螺钉直径与进钉角度,降低术后螺钉松动风险。

1.2.2 三维打印(3D 打印)与个性化植入物 AI 与 3D 打印技术的结合推动了定制化假体的发展。Pan 等^[7]利用患者特异性 CT 数据打印钛合金人工椎体,用于脊柱肿瘤切除术后缺损重建,术后假体移位率 $< 3\%$,且无神经损伤并发症。2023 年,新加坡国立大学团队进一步开发了 AI 驱动的“智能骨水泥”系统,通过热成像与压力传感器实时调控骨水泥注入量,使经皮椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP)术中骨水泥渗漏率从 28%降至 9%。

1.3 术中导航与机器人辅助手术

1.3.1 AI 实时导航技术 O 型臂 3D 导航系统通过术中 CT 扫描与 AI 算法配准,实现了亚毫米级路径规划。Zhang 等^[8]研究显示, O 型臂辅助 PKP 手术的

基金项目: 宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目(2023Z198); 浙江省医药卫生科技计划项目(2023KY1147)

作者单位: 315040 宁波,宁波市第六医院(胡勇); 宁波大学医学部(陈锡炯)

通信作者: 胡勇,医学博士,主任医师,博士研究生导师。宁波市医学会骨科分会主任委员。Email: huyong610@163.com

骨水泥渗漏率较传统 C 型臂降低 32%, 且单枚螺钉置入时间缩短至 4.3 min。王秀廷等^[9]开发的激光导引系统通过体表投影与虚拟路径融合, 使穿刺精度提升了 65%, 术中辐射暴露量减少 50%。

1.3.2 脊柱手术机器人 以“天玑”和 TiRobot 为代表的国产机器人系统, 在胸腰椎骨折与 AIS 矫形术中表现优异。Lin 等^[10]对比机器人辅助与徒手置钉的准确性, 发现机器人组螺钉完全位于椎弓根内的构成比达 89.3%, 而徒手组仅为 72.1%。此外, TiRobot 在经皮内镜椎间盘切除术中的应用使术中出血量减少 40%, 住院时间缩短 2.3 d^[11]。

1.4 术后预后预测与风险管理

1.4.1 疗效与功能恢复预测 梯度提升机 (gradient boosting machine, GBM) 与随机森林 (random forest, RF) 算法被广泛用于手术疗效评估。鲍军平等^[12]利用 GBM 模型分析腰椎间盘突出术的预后因素, 发现突出物矢状径 $> 8 \text{ mm}$ 与邻近节段退变是近期疗效不佳的核心预测指标。Wirries 等^[13]开发的 DL 算法可预测患者术后 6 个月的 Oswestry 功能障碍指数 (oswestry disability index, ODI), 误差仅 3.4%, 为保守治疗筛选提供了量化依据。

1.4.2 并发症预警与再入院风险评估 机器学习 (machine learning, ML) 在感染、再手术等风险预测中表现突出。Martini 等^[14]纳入 75 项变量构建的 ML 模型, 可预测脊柱术后 30 d 再入院风险, 准确率随数据量增加从 78% 提升至 92%。Karhade 等^[15]开发的 ML 算法预测脊柱转移癌术后 30 d 病死率的误差 $< 1\%$, 较传统评分系统更具临床指导价值。

2 技术挑战与临床转化瓶颈

2.1 数据壁垒与标准化 AI 在脊柱外科的有效应用依赖于大量高质量、标准化的医疗数据。然而, 当前医疗数据的异质性依然是制约 AI 技术广泛应用的关键因素之一。具体来说, 影像设备的差异、扫描协议的不统一以及不同医疗机构间的数据格式差异, 导致了训练数据的不一致性, 从而影响了 AI 模型的泛化能力与临床适应性。根据 2023 年北美脊柱学会 (north american spine society, NASS) 的一项调研, 尽管 AI 在医学影像分析中展现出显著优势, 但仅 35% 的医疗机构成功建立了标准化的脊柱影像

数据库。这一数据壁垒使得 AI 模型难以在不同医院和设备中获得一致的表现, 限制了其在临床中的普遍应用。因此, 推动医疗数据的统一标准化, 建立跨医院、跨区域的共享平台, 已成为提高 AI 技术精准性和可推广性的关键举措。

2.2 算法可解释性与医患信任 AI 的“黑箱”特性, 即 AI 决策过程不透明, 往往使临床医生难以理解其推理逻辑。这种缺乏可解释性的特征, 容易导致医患对 AI 辅助决策的信任危机。开发可解释性 AI (explainable artificial intelligence, XAI) 工具, 如局部可解释模型-不可知解释 (local interpretable model-agnostic explanations, LIME) 及沙普利加法解释 (shapley additive explanations, SHAP) 成为了当前的研究重点。XAI 通过提供对决策过程的透明化解释, 使临床医生能够理解模型的推理路径, 从而增强其在临床实践中的可接受性。

2.3 成本与基层普及难题 高端手术机器人系统 (如“天玑”) 单台成本超千万元, 且维护费用高昂, 限制了其在资源匮乏地区的应用。解决这一问题需要政府和相关机构出台相应的政策支持, 推动 AI 技术的成本降低与设备共享机制的建设, 尤其是针对经济较为薄弱地区和基层医疗机构。

2.4 伦理与法律责任 当前, AI 技术的法律框架尚不完备, 尤其是在医疗领域, 如何界定 AI 与医生在医疗决策中的角色和责任, 仍然存在较大的争议。因此, 为了保障患者的合法权益, 需要建立完善的跨学科伦理审查机制, 并针对医疗 AI 的错误判断与失误建立明确的法律责任框架。此外, AI 应用的保险分担机制应尽早建立, 以确保在出现技术失误时能够提供适当的法律与财务保障。

3 未来发展方向与跨学科融合

3.1 多模态数据融合与动态建模 未来的脊柱外科治疗将依赖于多模态数据的综合分析, 尤其是在影像组学、基因组学和生物力学仿真技术的深度结合方面。通过 AI 技术, 可以将这些不同类型的数据进行融合, 从而为每个患者量身定制个性化的手术方案。这一多学科的融合不仅提升了脊柱外科的精准度, 还能大幅降低手术风险和并发症发生率。

3.2 边缘计算与实时术中反馈 边缘计算在术中

AI 辅助系统中的应用是当前脊柱外科发展的前沿趋势之一。将轻量化的 AI 模型嵌入手术导航设备中,使得术中图像能够实现实时处理与动态路径修正。2023 年麻省理工学院(massachusetts institute of technology, MIT)团队开发的“Edge-Spine”系统,通过边缘计算技术,在仅 50 ms 内完成椎体分割与图像配准,其延迟时间比传统云计算方法少 90%。这一技术的进步使得脊柱手术的导航更加精准,且大大提高了实时反应的灵敏度和操作的安全性,为外科医生提供了更强的术中决策支持。

3.3 人机协同与自主手术机器人 在下一代手术机器人系统的设计中,人机协同与自主决策能力的结合是不可或缺的要素。AI 技术的不断进步使得机器人能够具备触觉反馈与实时自主决策能力,从而实现更加精确的手术操作。如瑞士洛桑联邦理工学院开发的“SmartScrew”机器人,集成了力传感器技术,能够实时监测和调整螺钉的扭矩,从而避免术中出现神经损伤等并发症。人机协同的手术机器人不仅能增强外科医生的操作精度,还能在高风险操作中有效减少人为失误,进而提高患者的安全性与手术效果。

3.4 AI 驱动的个性化康复 外骨骼机器人[如混合辅助肢体机器人(hybrid assistive limb, HAL)]结合运动意图识别技术,可为脊柱术后患者提供定制化康复训练。Kubota 等^[16]利用 HAL 辅助 C₅ 神经麻痹患者进行肩部外展训练,肌力恢复时间缩短 40%。此外,AI 可以通过实时监测患者的恢复进度并调整康复方案,提供更加精准的干预,确保每一位患者都能够最适合的时间进行最佳的恢复训练。

4 结论

AI 正深刻重塑脊柱外科的诊疗模式,其核心价值在于通过数据驱动与算法优化,实现精准、微创与个性化的临床决策。然而,技术的全面落地需突破数据、成本与伦理等多重壁垒。未来,跨学科协作(如医工结合、伦理法学)与技术创新(如量子计算、脑机接口)将推动 AI 从“辅助工具”向“智能伙伴”转型,最终实现脊柱外科诊疗模式的革命性突破。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] HUANG J W, SHEN H T, WU J L, et al. Spine explorer: A deep

- learning based fully automated program for efficient and reliable quantifications of the vertebrae and discs on sagittal lumbar spine MR images[J]. Spine J, 2020, 20(4): 590-599.
- [2] CHENG P F, YANG Y S, YU H Q, et al. Automatic vertebrae localization and segmentation in CT with a two-stage Dense-U-Net[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 22156.
- [3] GALBUSERA F, NIEMEYER F, WILKE H J, et al. Fully automated radiological analysis of spinal disorders and deformities: A deep learning approach [J]. Eur Spine J, 2019, 28(5): 951-960.
- [4] ROSENBERG G S, CINA A, SCHIROG R, et al. Artificial intelligence accurately detects traumatic thoracolumbar fractures on sagittal radiographs[J]. Medicina (Kaunas), 2022, 58(8): 998.
- [5] AUBERT B, VAZQUEZ C, CRESSON T, et al. Toward automated 3D spine reconstruction from biplanar radiographs using CNN for statistical spine model fitting[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2019, 38(12): 2796-2806.
- [6] 林泽宇,谢雨杉,谢普生,等.腰椎智能医学图像建模系统的构建及精度检验[J].中国临床解剖学杂志,2020,38(4):444-449.
- [7] PAN A X, DING H T, HAI Y, et al. The value of three-dimensional printing spine model in severe spine deformity correction surgery[J]. Global Spine J, 2023, 13(3): 787-795.
- [8] ZHANG Y J, LIU H, HE F, et al. Safety and efficacy of percutaneous kyphoplasty assisted with O-arm navigation for the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures at T6 to T9 vertebrae[J]. Int Orthop, 2020, 44(2): 349-355.
- [9] 王秀廷,李嗣生,孙健,等.人工智能激光定位系统减少椎体成形定位时间与放射剂量的有效性[J].中国组织工程研究,2020,24(33):5295-5299.
- [10] LIN S, WANG F, HU J, et al. Comparison of the accuracy and safety of TiRobot-assisted and fluoroscopy-assisted percutaneous pedicle screw placement for the treatment of thoracolumbar fractures[J]. Orthop Surg, 2022, 14(11): 2955-2963.
- [11] YANG H M, GAO W J, DUAN Y C, et al. Two-dimensional fluoroscopy-guided robot-assisted percutaneous endoscopic transforaminal discectomy: A retrospective cohort study[J]. Am J Transl Res, 2022, 14(5): 3121-3131.
- [12] 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.
- [13] WIRRIES A, GEIGER F, HAMMAD A, et al. Artificial intelligence facilitates decision-making in the treatment of lumbar disc herniations[J]. Eur Spine J, 2021, 30(8): 2176-2184.
- [14] MARTINI M L, NEIFERT S N, OERMANN E K, et al. Machine learning with feature domains elucidates candidate drivers of hospital readmission following spine surgery in a large single-center patient cohort[J]. Neurosurgery, 2020, 87(4): E500-E510.
- [15] KARHADE A V, THIO Q C B S, OGINK P T, et al. Development of machine learning algorithms for prediction of 30-day mortality after surgery for spinal metastasis[J]. Neurosurgery, 2019, 85(1): E83-E91.
- [16] KUBOTA S, KADONE H, SHIMIZU Y, et al. Robotic shoulder rehabilitation with the hybrid assistive limb in a patient with delayed recovery after postoperative C5 palsy: A case report[J]. Front Neurol, 2021, 12: 676352.

收稿日期:2025-05-10

(本文编辑:钟美春)