

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.02.050

人工智能在下肢骨折患者麻醉方式选择及监测中的应用研究进展

张梦露, 杨晶敬

(河南省洛阳正骨医院 (河南省骨科医院) 麻醉与围术期医学科, 河南洛阳 471000)

【摘要】 下肢骨折是骨科常见的创伤性疾病, 临床上此类患者主要采取手术治疗, 围手术期麻醉管理对手术效果及术后康复具有重要作用。传统麻醉方式及术中监测主要依赖麻醉医师的临床经验, 具有一定主观性。随着人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的发展, 其在麻醉领域的应用日益广泛。本文就 AI 在下肢骨折患者麻醉管理中的应用研究进展进行综述, 并探讨当前面临的挑战, 展望未来发展方向。

【关键词】 人工智能; 下肢骨折; 麻醉方式; 围手术期监测; 机器学习

【中图分类号】 R614; TP18

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2026) 02-0248-04

Research progress on the application of artificial intelligence in the selection and monitoring of anesthesia methods for patients with lower limb fractures

ZHANG Menglu, YANG Jingjing

(Anesthesiology and Perioperative Medicine Department, Luoyang Orthopedic-Traumatological Hospital of Henan Province (Henan Provincial Orthopaedic Hospital), Luoyang 471002, Henan, China)

【Abstract】 Lower limb fractures are a common traumatic disease in orthopedics. Clinically, surgical treatment is the main approach for such patients. The anesthesia management during the perioperative period plays a crucial role in the overall surgical outcome and the postoperative recovery of patients. Traditional anesthesia methods and intraoperative monitoring mainly rely on the clinical experience of anesthesiologists, which is somewhat subjective. With the development of artificial intelligence (AI) technology, its application in the field of anesthesia is becoming increasingly widespread. This article reviews the research progress of AI technology in anesthesia management for patients with lower limb fractures and discusses the current challenges, as well as the prospects for future development.

【Key words】 Artificial intelligence; Lower limb fractures; Anesthesia methods; Perioperative monitoring; Machine learning

下肢骨折是骨科常见的创伤性疾病, 随着人口老龄化加剧, 近年来发病率逐渐升高^[1]。对于下肢骨折手术, 麻醉方式的选择直接影响患者围手术期的舒适性及术后恢复^[2]。传统麻醉方式的选择主要根据患者病情、年龄、实验室检查指标等确定, 在很大程度上依赖麻醉医师的个人经验^[3]。人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术具有强大的数据处理与预测建模能力, 可整合电子病历、医学影像、实时生理数据等, 发掘深层次信息, 对麻醉方案选择和围手术期监测具有重要应用价值^[4]。AI 技术自 2018 年起逐渐广泛应用于麻醉领域, 至 2020 年深度学习

(deep learning, DL) 模型在图像识别方面逐渐发挥作用, 2023 年至今多模态数据融合与闭环控制系统逐渐成为研究热点。不同 AI 模型在预测性能、可解释性、实时性等方面存在较大差异。本文系统梳理 AI 技术在下肢骨折患者麻醉管理全流程中的应用进展, 重点关注麻醉方式选择和术中关键指标监测方面的研究现状, 为临床麻醉研究提供参考。

1 AI 在下肢骨折患者麻醉方式选择中的辅助作用

1.1 基于多模态数据的术前风险评估

术前健康状况评估在个体化麻醉决策管理中具有基础性作用, 目前临床常用美国麻醉医师协会

收稿日期: 2025-05-08。

作者简介: 张梦露, 硕士研究生, 住院医师, 研究方向: 围术期认知功能障碍。E-mail: 17538526094@163.com。

(American Society of Anesthesiologists, ASA)健康状况分级,但其具有一定主观性。研究表明,大模型语言具备较强的预测ASA分级预测能力,能够整合复杂的术前信息^[5]。黄家号^[6]等利用贝叶斯算法开发了堆叠集成模型,并应用于非心胸手术患者的术前风险评估中。早期传统机器学习(machine learning, ML)方法准确性有限,后期随机森林(random forest, RF)等模型的出现使预测价值显著提升,目前基于DL的多模态融合模型预测效能已达较高水平。此类AI模型可整合患者病史、用药史、实验室检查等多方面信息,识别高风险个体。对于下肢骨折患者,尤其是常合并高血压、冠心病、糖尿病等慢性病的老年患者,应用AI技术可帮助麻醉医师精准判断其对不同麻醉方式的耐受程度,从而做出更安全的麻醉选择。

1.2 辅助区域麻醉选择与风险预测

下肢骨折手术常选择区域麻醉,如椎管内麻醉、腰丛神经阻滞、坐骨神经阻滞等,上述方式均能提供较满意的术后镇痛效果,对维持血流动力学稳定也具有显著优势^[7]。但区域麻醉效果在很大程度上依赖精准的解剖定位和操作技术。AI技术在此方面具有较强的辅助作用,首先,在困难气道预测方面,若区域麻醉效果不佳需中转全身麻醉,气道管理仍是麻醉医师需重点关注的风险环节。AI模型可通过分析患者面部图像、超声影像等信息,提前识别困难气道。郭艺等^[8]使用卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)分析了16种不同姿势下的面部图像,构建了困难喉镜暴露模型,验证结果满意。高端等^[9]采用随机森林模型通过面部形态预测困难气道,也取得满意效果。CNN需大量标注图像数据,训练耗时较长,但准确率较高;RF模型的训练速度快,可解释性好,准确率约92%,但泛化能力不及DL模型。对于计划实施椎管内麻醉的下肢骨折患者,术前应用AI技术识别困难气道,可为术中麻醉方式转换做好充分准备,提升整体麻醉管理质量及围手术期安全性。此外,超声引导在区域麻醉中起重要作用,但其效果依赖操作者对超声图像的解读能力。基于U-Net架构的DL模型可在超声图像上实时生成彩色叠加,突出显示血管、神经、骨骼等重要结构,为穿刺操作提供精准指导。杨桐等^[10]研究证实,基于U-Net架构的DL模型可在93.5%的患者超声图像

中识别局部阻滞关键结构,对下肢骨折患者腰丛、骶丛神经阻滞具有重要辅助作用。该模型与常规图像分割算法相比,识别精度明显提升,且对低对比度超声图像的适应性更强。另一方面,AI技术还可预测区域阻滞穿刺难度,从而降低反复穿刺所致损伤风险。

2 AI在下肢骨折患者麻醉监测中的应用

2.1 血流动力学的智能化管理

下肢骨折手术患者术中易发生低血压等并发症, Lee等^[11]研究显示,术中低血压可导致心肌损伤、急性肾损伤(acute kidney injury, AKI),甚至增加死亡风险。AI技术在预测术中低血压方面取得了显著进展。传统血压监测方法多为被动监测,而自基于ML算法的低血压预测指数出现后,术中血压监测逐渐转变为主动预警。2018年首个基于有创动脉波形的低血压预测指数原型发表,2021年出现基于无创血压和DL的预测模型,2022—2023年集成多参数的混合模型将预测提前时间从5 min延长至15 min。基于无创血压的DL模型虽应用便捷,但预测准确率低于有创血压模型。该项AI技术通过分析有创动脉波形,可提前15 min预测低血压事件,具有较高的敏感度和特异度。对于下肢骨折手术患者,术中应用此类AI技术,可使麻醉医师有足够的事件应对低血压事件,有效降低低血压发生率及缩短持续时间,减轻对患者的损伤。

下肢骨折患者术中血流动力学稳定对手术具有重要影响,准确评估心功能及容量状态对维持血流动力学稳定意义重大。DL模型可从12导联心电图快速识别左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)降低的患者,其作用与超声心动图相当。对于术前未行充分心功能评估的下肢骨折患者,此项AI技术可实现实时心功能筛查。AI辅助超声设备可自动测定下腔静脉塌陷率,已有研究证实其评估结果与专家评估的一致性达95%,且效率明显提升^[12]。AI技术的发展有效促进了麻醉监测由单一指标向闭环控制的转变。曹悦等^[13]研究显示,肌松闭环输注系统可将患者平均动脉压维持在目标范围内的时间比例从66%提升至95%。上述监测技术虽尚未普及,但有望形成闭环系统,实现下肢骨折患者术中血流动力学的全自动化管理。

2.2 麻醉深度监测

麻醉深度监测是麻醉管理的重要内容,目前临床常用脑电双频指数(bispectral index, BIS)评价麻醉深度,但该指标存在一定滞后性。AI技术有望通过对原始脑电图的深度分析实现麻醉深度监测。相关研究表明,利用CNN和长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)的混合模型可区分不同麻醉药物的脑电特征,并预测相应麻醉深度,具有较高的准确率^[14]。与传统BIS监测相比,CNN和LSTM的混合模型可每0.5 s输出一麻醉深度指数,滞后时间缩短至10 s以内,对丙泊酚和七氟烷诱导的不同脑电模式识别准确率高达91%。利用AI辅助的多模态麻醉深度监测系统可整合脑电、心电及血流动力学等指标,对患者整体状态进行评估,帮助麻醉医师获取准确信息并及时调整麻醉方案,减少麻醉相关并发症的发生。

2.3 气道管理

虽然多数下肢骨折手术采用区域麻醉,但仍存在中途转为全身麻醉的可能,AI技术在气道管理中发挥了重要作用。在术前困难气道预测的基础上,AI技术可在人工气道建立方面提供辅助。2019年,首个AI辅助视频喉镜原型问世;2021年,多模态气管插管智能导航装置正式进入临床验证;随后,基于机器人系统的自动插管装置开始应用于人体试验,插管成功率显著提升。结合AI算法和可视化技术,多模态气管插管智能导航装置可显著缩短插管时间。基于机器人系统的自动插管装置已具备与麻醉医师相当的插管能力。此类技术在处理突发困难气道及提升气道管理安全方面均具有重要意义。

3 AI技术在下肢骨折患者术后管理中的应用

3.1 术后疼痛管理

术后疼痛是影响下肢骨折患者术后活动及康复的主要因素,AI技术在疼痛评估与管理方面已展现出独特优势。传统疼痛评估主要依赖患者个人主诉,主观性较强,且对无法有效沟通的患者实施难度较大。张妮等^[15]研究显示,基于面部表情分析的DL系统可有效识别术后疼痛程度,及时发现重度疼痛患者,具有较高的应用价值。与传统疼痛评分相比,AI面部表情分析系统可在5 s内完成疼痛评估,与患者自评结果一致性较高,同时提升了评估效率。AI模型可整合术前、术中各类数据,预测患者术后疼痛风险。

3.2 术后并发症风险预测

下肢骨折患者术后常见并发症包括术后谵妄、肺部并发症及心血管事件等,严重并发症可导致住院时间延长,影响术后功能恢复。目前已有多种ML算法[如图神经网络(graph neural network, GNN)]用于预测术后谵妄。针对下肢骨折患者,积极开发并应用术后谵妄预测模型,可有效识别高危患者,及时采取干预措施,对降低术后谵妄风险具有重要意义。肺部并发症是患者术后死亡的重要原因之一,多数下肢骨折患者为高龄人群,肺部并发症风险较高,利用AI模型可整合患者术前呼吸功能、手术及麻醉因素、术中通气参数等数据,制定针对性干预措施。AI技术在预测心血管事件、AKI等并发症方面也取得了一定进展。李泽茂等^[16]利用AI冠状动脉周围脂肪影像组学和衰减指数预测冠心病患者主要心血管不良事件(major adverse cardiovascular events, MACE),预测效能较好。此类研究对指导AI技术在下肢骨折麻醉管理中的应用具有重要参考价值(表1)。

表1 AI技术在下肢骨折患者麻醉管理中的应用对比

应用领域	AI技术/模型	优势	局限性
术前风险评估	贝叶斯算法、堆叠集成模型	多模态数据整合	计算复杂度高,需大量结构化数据
困难气道预测	CNN、RF	CNN准确率约94%,RF可解释性好	CNN需大量标注图像,RF泛化能力稍弱
超声引导神经阻滞	U-Net DL模型	识别准确率93.5%,优于传统分割算法	依赖高质量超声图像,对噪声敏感
术中低血压预测	CNN + LSTM	敏感度/特异度 > 85%时,主动预警	需有创动脉波形,设备成本较高
麻醉深度监测	CNN + LSTM混合模型	更新频率高,对药物特异性识别好	模型复杂,实际临床验证尚不充分
自动气管插管	机器人系统+多模态导航	处理突发困难气道,标准化操作	插管时间略长,设备昂贵
术后疼痛评估	面部表情分析DL系统	快速评估,不依赖患者主诉	面部遮挡或表情异常时准确性下降
术后谵妄预测	GNN	捕捉复杂变量交互,预测效能高	临床尚未普及,需多中心验证

注: AI: 人工智能; CNN: 卷积神经网络; RF: 随机森林; DL: 深度学习; LSTM: 长短期记忆网络; GNN: 图神经网络。

4 结语

随着AI技术的不断发展,其在麻醉领域的应用愈发广泛。对于下肢骨折患者,从术前辅助麻醉方案的选择,到术中血流动力学和麻醉深度的监测,再到术后疼痛及并发症的管理,AI技术正不断推动麻醉医学向更加精准和智能的方向发展。麻醉医师应积极探索AI技术的原理和价值,在麻醉领域充分发挥AI技术的特色与优势。

参考文献

- [1] 唐佩福. 下肢骨折诊治的前沿问题[J]. 中华创伤骨科杂志, 2025, 27 (3): 185-188.
- [2] 杨昌雄, 张合茂, 王超, 等. 腰麻-硬膜外联合麻醉对老年下肢骨折患者术后镇痛及凝血功能的影响[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43 (14): 3401-3404.
- [3] 孙忠锋, 王昭君, 田保贵. 股神经联合股外侧皮神经阻滞麻醉与腰硬联合麻醉在老年危重症患者下肢骨折手术中的效果[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43 (2): 313-317.
- [4] BARTKOWSKI J, ZERDKA J, BRASSE P, *et al.* Artificial Intelligence in Medicine With Emphasis on Orthopedic Practice[J]. Cureus, 2025, 17(12):e98306.
- [5] 李琳, 高巨, 葛亚丽, 等. 人工智能技术辅助麻醉科低年资住院医师制订术前麻醉方案的可行性[J]. 中华麻醉学杂志, 2024, 44 (4): 461-465.
- [6] 黄家号, 李雨捷, 刘祥, 等. 基于术中指标建立非心胸手术后呼吸衰竭梯度提升预测模型[J]. 陆军军医大学学报, 2023, 45 (8): 739-745.
- [7] TIAN C, XUE J, CUI H, *et al.* Association of ultrasound-assisted combined with conventional anatomical landmark paramedian spinal anesthesia and its impact on first pass success rate in patients with lower limb fractures-A retrospective cohort study[J]. PLoS One, 2025, 20(10):e0334455.
- [8] 郭艺, 杜秋晨, 吴朦朦, 等. 人工智能赋能麻醉监护仪实现麻醉深度监测[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47 (1): 43-46.
- [9] 高端, 朱小兵, 陈伟涛, 等. 基于随机森林算法建立无痛胃镜检查期间低氧血症的预测模型[J]. 华夏医学, 2025, 38 (6): 85-93.
- [10] 杨桐, 张姗姗, 江方舟, 等. 基于深度学习与自适应对比度增强的臂丛神经超声图像优化[J]. 计算机科学, 2019, 46 (S11): 236-240.
- [11] LEE S, ISLAM N, LADHA K S, *et al.* Intraoperative Hypotension in Patients Having Major Noncardiac Surgery Under General Anesthesia: A Systematic Review of Blood Pressure Optimization Strategies[J]. Anesth Analg, 2025, 141(1): 38-60.
- [12] 罗嘉宝, 张峰. 人工智能在血管超声中的应用现状及进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2025, 42 (11): 1001-1007.
- [13] 曹悦, 白延斌. 肌松闭环输注系统在全麻手术中的应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15 (3): 1661-1667.
- [14] 胡存林, 叶晔. 基于卷积循环神经网络的运动想象脑电信号模式识别[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2024, 34 (1): 50-55.
- [15] 张妮, 聂煌. 基于面部表情的术后疼痛人工智能评估系统研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14 (4): 1713-1718.
- [16] 李泽茂, 丁静, 马汝航, 等. 基于人工智能的冠状动脉周围脂肪影像组学及衰减指数构建可解释性机器学习模型预测冠心病患者主要心血管不良事件发生[J]. 临床放射学杂志, 2025, 44 (3): 456-464.