

• 综 述 General review •

人工智能在介入医学中的应用及前景

杨子雨, 朱锡雨, 虞隽扬, 肖丁奕, 卞雅晴, 黄蔚, 吴志远, 丁晓毅,
王忠敏, 顾峻玮

【摘要】 人工智能(AI)在医学领域深入研究,极大地改善了放射诊断学工作流程和诊断能力。该文重点介绍了 AI 技术在介入医学领域的应用,并列举其潜在应用场景,包括提升图像分析能力以辅助诊断和预测治疗后反应,同时还描述了实际应用中需要克服的各种挑战。随着 AI 在介入医学中不断发展,AI 将进一步优化介入医学渠道,为介入医学临床实践带来革命性变革。

【关键词】 介入医学;人工智能;机器学习;深度学习

中图分类号:TP18 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2025)-004-0441-04

Application and prospect of artificial intelligence in interventional medicine YANG Ziyu, ZHU Xiyu, YU Juanyang, XIAO Dingyi, BIAN Yaqing, HUANG Wei, WU Zhiyuan, DING Xiaoyi, WANG Zhongmin, GU Junwei. College of Health Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200025, China

Corresponding author:GU Junwei, E-mail:1182115013@qq.com

【Abstract】 The in-depth research of artificial intelligence in the medical field has greatly improved the workflow and diagnostic ability of diagnostic radiology. This article focuses on artificial intelligence technology in the field of interventional medicine, and enumerates its potential application scenarios, including improving image analysis capabilities to assist diagnosis and predict treatment response. It also describes the challenges that need to be overcome for practical application. Finally, with the continuous development of artificial intelligence in interventional medicine, artificial intelligence will further optimize the channels of interventional medicine and bring revolutionary changes to the clinical practice of interventional medicine.

【Key words】 interventional medicine; artificial intelligence; machine learning; deep learning

人工智能(artificial intelligence, AI)作为一种应用计算机工程和软件开发解决复杂难题的技术,20 世纪 50 年代被首次正式引入^[1]。自引入以来, AI 领域不断扩展,涌现出机器学习(machine learning, ML)和深度学习(deep learning, DL)等诸多分支^[2]。ML 是 AI 一子领域,其算法通过从数据中学习并进行自我训练。在经典 ML 中,专家识别并编码数据中独有特征,进而利用统计技术并依据这些特征对数据进行识别与分类。例如,为了分析图像,图像处理专家需要设计算法,将输入图像分解为边缘、梯度和纹理等基本元素,通过统计分析这些特征达成图像分类或解读^[3]。DL

是一类 ML 方法,也称为深度神经网络学习,其原理在于通过构建由数百万个计算机生成的连接(即神经网络)形成记忆,这些网络功能与大脑类似。相较于传统 ML, DL 优势在于无需将图像特征识别和计算作为前置步骤,相反这些特征在学习过程中被自动确定^[4]。这一特性使得 DL 在处理复杂数据和模式识别任务时具有更高的效率和准确性。

AI 作为一门涉及多个分支的学科,在多个维度上均展现出强大的工具效能^[5]。随着 AI 显著进步,介入医师能够更好地完善患者手术计划和围手术期管理,提高医疗服务质量。

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2025.04.019

作者单位:200025 上海 上海交通大学医学院医学技术学院(杨子雨);上海交通大学医学院附属瑞金医院放射介入科(朱锡雨、虞隽扬、肖丁奕、卞雅晴、黄蔚、吴志远、丁晓毅、王忠敏、顾峻玮、杨子雨)

通信作者:顾峻玮 E-mail:1182115013@qq.com

1 AI 在介入医学中的应用

1.1 介入术前

在术前准备阶段,传统治疗方式是介入科医师全面整合患者各项数据,并基于现有临床指南开展术前讨论,评估手术方案、风险,制定最优治疗策略^[6]。AI 在该方面具有很好的应用前景。计算机通过从给定数据中进行学习,将患者诊断图像、临床数据、特征和计划干预结果整合成队列,构建工作模型,进而分析这些模型变量与程序结果间的关联^[7]。AI 辅助介入医师制定治疗决策,不仅有助于最大限度地降低患者风险,减少医疗成本,还能避免不必要的治疗,从而优化临床结果^[8]。

介入肿瘤学领域可以从 AI 中受益匪浅。Daye 等^[2]证明了 ML 可有效预测肾上腺转移瘤消融治疗后局部进展。肾上腺转移瘤在 CT 上常表现为不规则形状和不均匀衰减等特征,纹理分析则通过从数字医学图像中提取定量高维数据,获得目前临床预后标志物不能代表的肿瘤特征^[9]。有实验结果表明,CT 纹理特征在预测患者群体局部复发和生存方面有额外优势,其准确率高达 95%^[10]。因此,术前了解哪些患者在消融术后可能存在较高局部复发风险,将有助于更加精准地制定消融计划。

在急性缺血性脑卒中治疗中,紧急再灌注是关键的治疗目标,然而确立一套用于筛选可能从血管内干预中获益患者的标准化体系是当前主要挑战。Asadi 等^[11]采用监督 ML 算法成功预测脑卒中患者手术结果,准确率高达近 70%。此外,机械血栓切除术(mechanical thrombectomy, MT)相关策略选择及血栓清除难度预测仍是研究热点,目前尚缺乏定量决策依据。有研究通过系统分析血栓范围、形态、纹理等特征,开发出了能够基于凝块的影像组学预测急性缺血性脑卒中成功再通的 MT 策略^[12]。

增强现实(augmented reality, AR)和虚拟现实(virtual reality, VR)技术的快速发展为手术医师提供了全新可视化手段。这些技术能够将 CT 或 MR 获取的虚拟 3D 解剖数据实时叠加到真实世界 2D 视觉图像上,使手术过程更加直观^[13]。将其纳入临床实践将使困难的解剖可视化,而不会增加患者风险^[14]。这不仅可提高操作效率和性能,还可减少患者和操作人员辐射暴露。

1.2 介入术中

在血管介入手术中,导丝与导管在复杂血管网络中精准导航是一项基础却充满挑战的任务^[15]。鉴于血管形态多变,导管与血管壁间摩擦及弹性形变常导致预测远端导管尖端运动十分困难^[16]。为

此,Behr 等^[17]提出了一种基于深度强化学习的闭环控制系统,该系统能够自主控制并导航导丝在血管模型中行进。强化学习是 AI 一分支,其通过与环境互动并不断优化行为以最大化累积奖励^[18]。上述研究设计的导丝操作机器平均成功率能高达 89.6%,显示出其在实际应用中的潜力。血管分析亦是 AI 发展重要领域。Molony 等^[19]开发了一种 ML 方法,该方法能够分割血管内超声图像并自动计算管腔面积和斑块负荷,其分析结果与专家评估高度一致。Cho 等^[20]基于回归树梯度提升的集成 ML 算法,使用临床参数和单个投影图像计算血管造影特征,通过特定 12 项特征进行训练,以血流储备分数(fractional flow reserve, FFR) ≤ 0.80 预测病变,总体准确率为 82%,提升了血管造影在评估中度冠状动脉狭窄方面的应用价值。

在非血管介入使用消融技术治疗患者时,确保病灶最佳覆盖与安全消融边界至关重要,术前诊断图像与术中或术后图像精确配准有助于提高穿刺和治疗效果^[21]。然而,受限于患者体位变化、呼吸时相差异、呼吸暂停以及消融前后图像质量和组织纹理变化,实现这一目标往往面临挑战^[22]。此时,AI 介入能够显著克服刚性和非刚性配准难题。Wei 等^[23]提出了一种新颖的基于 DL 配准方式,该方法能有效解决 2D 超声图像与 3D MR/CT 图像体积配准问题,通过利用分类网络估算超声探头角度,并结合分割技术确定术前 CT 或 MR 图像中超声平面,显著提高了术中图像配准的准确性。

1.3 介入术后

在介入治疗术后阶段,AI 在衡量治疗反应、预后方面发挥作用。医师在术后需要密切观察患者反应,通过影像或检验指标评估手术疗效,这对医师专业能力提出较高要求,同时也增加了随访期间误判风险^[24]。AI 有助于更准确地评估这些特定治疗反应。在治疗随访纵向研究中,AI 能够检测图像间细微变化,从而更早地识别疾病进展或复发,如基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)构建的 SVM 模型预测高级别胶质瘤总生存期的准确率为 89.9%^[25],基于增强 CT 图像构建 k 近邻、RF、逻辑回归、SVM 等 4 种模型预测转移性肾细胞癌纳武利尤单抗治疗反应的准确率分别为 82%、71%、91%、81%^[26]。

经动脉化疗栓塞术(TACE)是治疗不可切除的肝细胞癌主要手段。量化 TACE 疗效,通常依赖于治疗前后增强 MR 或 CT 图像对比^[27]。Abajian 等^[27]结合 MR 成像和临床患者数据,应用 ML 技术

构建用于预测 TACE 疗效的 AI 框架。该框架核心是将患者分为应答者和无应答者两组,根据接受 TACE 治疗患者回顾性数据筛选出包括基线临床、实验室、人口统计学和影像学特征在内的核心数据,剔除方差小且对结局变量贡献小的特征。最终,该模型在预测 TACE 治疗反应方面展现了 78% 总体准确率,其阴性预测值高达 88.5%,表现出色。

1.4 培训与教育

ML 与 AR 系统融合为受训者提供了新的平台,以提升操作技能^[28]。在骨科领域,近期研究展示了一种手术模拟工具,该工具将 VR 与解剖学物理模型相结合,形成一种混合模拟技术。这种混合系统不仅继承了物理模拟器优势,能够模拟人体组织特性,还允许受训者使用真实手术器械并体验逼真的触觉反馈^[29]。这一创新为手术训练提供了新的可能性。

2 AI 在介入医学面临挑战

AI 在介入放射学潜在应用范围日益广泛,相关学术论文数量也在持续攀升,但这些项目仍面临一系列共同挑战^[6]。DL 虽然能产生高度可靠的结果,但其内在“不透明性”成为应用一大障碍。许多学习算法无法显示决策方式和原因,因此即使是行业内顶级专家也很难完全理解所谓“黑箱”模型^[30],导致人们对 AI 系统的信心会因模型缺乏可解释性受到阻碍。随着对 AI 技术关注度提高,人们对“可信 AI”需求也日益迫切,可解释的人工智能(explainable artificial intelligence, XAI)应运而生,其提供了揭示 AI 决策的工具^[31]。这包括但不限于理解 AI 模型的内部机制,阐释机器如何根据特征集合决定结果以及将抽象 XAI 概念转化为人类可理解的形式^[32]。其中一些方法通过学习可解释的代理模型模拟黑盒模型输入-输出关系提供解释,如局部可解释模型不可知解释及知识蒸馏;另一类方法则侧重于通过归因输入特征或中间特征阐释黑盒模型,典型代表包括梯度加权类激活映射和 SHapley 加法解释^[33]。基于知识蒸馏方法使得预测结果更加透明和可解释,但可能有信息损失风险。基于梯度方法为用户提供对模型关注度的直观视觉展示,却往往局限于输入特征局部解释,难以全面反映模型整体决策过程,导致对模型行为理解的片面性^[34]。

DL 过程依赖大量高质量训练数据,因此在处理患者数据时必须谨慎^[31]。例如,不同医院的数据可能存在差异,导致训练模型在其他医院无法推广^[35]。此外,不同专家在疾病诊断时主观评估也可

能存在偏差^[36]。为了管理异构数据,建立跨机构标准化机制尤为重要。在匹配异构数据集时,通常采取两种主要方法:语义匹配和词汇匹配。其中,词汇匹配侧重于直接寻找数据集特征间字符串相似性,而语义匹配更为深入地考量了特征所属类别间关联性^[37]。

建立 AI 神经网络离不开大量标准化案例,建立充足的病例库依赖于不同医疗机构间合作与数据共享,甚至涉及国际协作^[38]。考虑到企业竞争和各方利益,这种合作困难重重,甚至可能侵犯患者隐私^[39]。此外,在介入操作期间,大部分以透视图像形式生成的数据不被保存,导致数据丢失^[40]。

3 总结与展望

毫无疑问,AI 正在改变医学各领域,其不是威胁,而是巨大机遇。通过正确应用 AI 可帮助介入医师在诊断、计划和治疗管理方面做出更迅速准确和更高效决策,通过更早识别疾病及治疗和更少侵入性,为患者带来更精准的医疗干预和治疗体验,并最终提高疾病诊疗效果。未来随着技术不断进步和应用场景不断拓展,相信 AI 将会为介入医学发展带来更多创新和突破。

[参考文献]

- [1] D'Amore B, Smolinski-Zhao S, Daye D, et al. Role of machine learning and artificial intelligence in interventional oncology [J]. *Curr Oncol Rep*, 2021, 23: 70.
- [2] Elizabeth VE, Sean R, CM ACM, et al. Artificial intelligence, augmented reality, and virtual reality advances and applications in interventional radiology [J]. *DIAGNOSTICS*, 2023, 13: 892-892.
- [3] Chartrand G, Cheng PM, Vorontsov E, et al. Deep learning: a primer for radiologists [J]. *Radiographics*, 2017, 37: 2113-2131.
- [4] Erickson B, Korfiatis P, Akkus Z, et al. Machine learning for medical imaging [J]. *Radiographics*, 2017, 37: 505-515.
- [5] Kallini JR, Moriarty JM. Artificial intelligence in interventional radiology [J]. *Semin Intervent Radiol*, 2022, 39: 341-347.
- [6] Seah J, Boeken T, Sapoval M, et al. Prime time for artificial intelligence in interventional radiology [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2022, 45: 283-289.
- [7] Iezzi R, Goldberg S, Merlino B, et al. Artificial intelligence in interventional radiology: a literature review and future perspectives [J]. *J Oncol*, 2019, 2019: 6153041.
- [8] Waller J, O' Connor A, Rafaat E, et al. Applications and challenges of artificial intelligence in diagnostic and interventional radiology [J]. *Pol J Radiol*, 2022, 87: e113-e117.

- [9] Daye D, Staziaki PV, Furtado VF, et al. CT texture analysis and machine learning improve post-ablation prognostication in patients with adrenal metastases: a proof of concept [J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2019, 42: 1771-1776.
- [10] Gurgitano M, Angileri SA, Roda GM, et al. Interventional radiology ex-machina: impact of artificial intelligence on practice[J]. Radiol Med, 2021, 126: 998-1006.
- [11] Asadi H, Dowling R, Yan B, et al. Machine learning for outcome prediction of acute ischemic stroke post intra-arterial therapy[J]. PLoS One, 2014, 9: e88225.
- [12] Hofmeister J, Bernava G, Rosi A, et al. Clot-based radiomics predict a mechanical thrombectomy strategy for successful recanalization in acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2020, 51: 2488-2494.
- [13] 吴志远, 程永德. 数字介入——当介入放射学遇上数字医学[J]. 介入放射学杂志, 2024, 33: 1-6.
- [14] Uppot RN, Laguna B, McCarthy CJ, et al. Implementing virtual and augmented reality tools for radiology education and training, communication, and clinical care[J]. Radiology, 2019, 291: 570-580.
- [15] Baum RA, Baum S. Interventional radiology: a half century of innovation[J]. Radiology, 2014, 273: S75-S91.
- [16] Desai SB, Pareek A, Lungren MP. Current and emerging artificial intelligence applications for pediatric interventional radiology[J]. Pediatr Radiol, 2022, 52: 2173-2177.
- [17] Behr T, Pusch TP, Siegfarth M, et al. Deep reinforcement learning for the navigation of neurovascular catheters[J]. Curr Dir Biomed Eng, 2019, 5: 5-8.
- [18] Jonsson A. Deep reinforcement learning in medicine [J]. Kidney Dis (Basel), 2019, 5: 18-22.
- [19] Molony D, Hosseini H, Samady H. TCT-2 deep IVUS: a machine learning framework for fully automatic IVUS segmentation[J]. J Am Coll Cardiol, 2018, 72: B1-B1.
- [20] Cho H, Lee JG, Kang SJ, et al. Angiography-based machine learning for predicting fractional flow reserve in intermediate coronary artery lesions[J]. J Am Heart Assoc, 2019, 8: e011685.
- [21] Gunay G, Luu M, Moelker A, et al. Semiautomated registration of pre-and intraoperative CT for image-guided percutaneous liver tumor ablation interventions [J]. Med Phys, 2017, 44: 3718-3725.
- [22] Posa A, Barbieri P, Mazza G, et al. Technological advancements in interventional oncology [J]. Diagnostics, 2023, 13: 228-228.
- [23] Wei W, Haishan X, Alpers J, et al. A deep learning approach for 2D ultrasound and 3D CT/Mr image registration in liver tumor ablation[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2021, 206: 106117.
- [24] 何梓君, 孔 健. 人工智能在介入放射学中的运用前景及挑战[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32: 1251-1255.
- [25] 刘亚欧, 段云云. MRI 结合人工智能技术预测弥漫性胶质瘤分子病理研究进展[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40: 801-804.
- [26] 李春香, 马文娟, 张 蕾, 等. 人工智能在肾肿瘤影像学中的应用研究进展[J]. 临床放射学杂志, 2024, 43: 1034-1037.
- [27] Abajian A, Murali N, Savic LJ, et al. Predicting treatment response to intra-arterial therapies for hepatocellular carcinoma with the use of supervised machine learning: an artificial intelligence concept[J]. J Vasc Interv Radiol, 2018, 29: 850-857.
- [28] Meek RD, Lungren MP, Gichoya JW. Machine learning for the interventional radiologist[J]. AJR Am J Roentgenol, 2019, 213: 782-784.
- [29] Condino S, Turini G, Parchi PD, et al. How to build a patient-specific hybrid simulator for orthopaedic open surgery: benefits and limits of mixed-reality using the microsoft HoloLens[J]. J Healthc Eng, 2018, 2018: 5435097.
- [30] Neri E, Aghakhanyan G, Zerunian M, et al. Explainable AI in radiology: a white paper of the Italian Society of Medical and Interventional Radiology[J]. Radiol Med, 2023, 128: 755-764.
- [31] Yang G, Ye QH, Xia J. Unbox the black-box for the medical explainable AI via multi-modal and multi-centre data fusion: a mini-review, two showcases and beyond[J]. Inf Fusion, 2022, 77: 29-52.
- [32] Maloca PM, Müller PL, Lee AY, et al. Unraveling the deep learning gearbox in optical coherence tomography image segmentation towards explainable artificial intelligence [J]. Commun Biol, 2021, 4: 170.
- [33] Li XH, Cao CC, Shi YH, et al. A survey of data-driven and knowledge-aware explainable AI[J]. IEEE Trans Knowl Data Eng, 2022, 34: 29-49.
- [34] 何晓曦, 蔡云鹏. 人工智能可解释性的研究现状及在医学领域应用效果评测[J]. 集成技术, 1-20.
- [35] Obermeyer Z, Emanuel EJ. Predicting the future: big data, machine learning, and clinical medicine[J]. N Engl J Med, 2016, 375: 1216-1219.
- [36] Krause J, Gulshan V, Rahimy E, et al. Grader variability and the importance of reference standards for evaluating machine learning models for diabetic retinopathy[J]. Ophthalmology, 2018, 125: 1264-1272.
- [37] Pezoulas VC, Kourou KD, Kalatzis F, et al. Medical data quality assessment: On the development of an automated framework for medical data curation[J]. Comput Biol Med, 2019, 107: 270-283.
- [38] Thrall JH, Li X, Li Q, et al. Artificial intelligence and machine learning in radiology: opportunities, challenges, pitfalls, and criteria for success. [J]. J Am Coll Radiol, 2018, 15: 504-508.
- [39] Tadavarthi Y, Vey B, Krupinski E, et al. The state of radiology AI: considerations for purchase decisions and current market offerings[J]. Radiol Artif Intell, 2020, 2: e200004.
- [40] Mazaheri S, Loya MF, Newsome J, et al. Challenges of implementing artificial intelligence in interventional radiology [J]. Semin Intervent Radiol, 2021, 38: 554-559.

(收稿日期: 2024-04-17)

(本文编辑: 谷 珂)