[20] PIVNIOUK V,JUNIOR J A G, HONEKER L, et al.The role of innate immunity in asthma development and protection: Lessons from the environment[J].Clin Exp Allergy,2020,50(3):282-290.
[21] CHEN X,QIU C.Respiratory tract mucous membrane microecology and asthma[J].Ann Transl Med,2019,7(18):495.
[22] 翟建宾,赵宏达,赵臣亮,等.益肺化痰汤减轻哮喘脾虚证大鼠气道高黏状态的作用与机制[J].中国实验方剂学杂志,2022,28(16):100-108.
[23] UYTTEBROEK S,CHEN B,ONSEA J,et al.Safety and efficacy of phage therapy in difficult-to-treat infections: A systematic review[J].Lancet Infect Dis,2022,22(8):208-220.
[24] FURLONG-SILVA J,CHARLES COOK P.Fungal-mediated lung allergic airway disease: The critical role of macrophages and dendritic cells[J].PLoS Pathog,2022,18(7):1010608.
[25] WHESTSTONE C,RANJBAR M,OMER H,et al.The Role of Airway Epithelial Cell Alarmins in Asthma[J].Cells,2022,11(7):1105.
[26] BARCIK W, BOUTIN R C T,SOKOLOWSKA M,et al.The Role of Lung and Gut Microbiota in the Pathology of Asthma[J].Immunity,2020,52(2):241-255.
[27] THIRIOU D, MORIANOS I, XANTHOU G, et al.Innate immunity as the orchestrator of allergic airway inflammation and resolution in asthma[J].Int Immunopharmacol,2017,48:43-54.
[28] AINGUY-SEERS S,LAVOIE J P.Glucocorticoid treatment in horses with asthma: A narrative review[J].J Vet Intern Med,2021,35(4):2045-2057.
[29] LAN F, ZHANG N, HOLTAPPELS G, et al.Staphylococcus aureus Induces a Mucosal Type 2 Immune Response via Epithelial Cell-derived Cytokines[J].Am J Respir Crit Med,2018,198(4):452-463.
[30] ESSILFIE A T,SIMPSON J L,HORVAT J C,et al.Haemophilus influenzae infection drives IL-17-mediated neutrophilic allergic airways disease[J].PLoS Pathog,2011,7(10):1002244.

收稿日期:2023-10-17
(本文编辑:陈志翔)

人工智能在膝关节 MRI 诊断中的应用进展

林恒屹,冯仁海,尹彬彬,王柏森

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2024.02.040
【中图分类号】 R816.8 【文献标志码】 C 【文章编号】 1671-0800(2024)02-0277-04

由于解剖结构复杂而精细,膝关节是最容易受到严重损伤的身体部位之一。膝关节病变发病率高且具有致残、致畸的风险,严重影响患者生活质量,并给社会、经济带来巨大负担。精准判断膝骨关节疾病进程及状态,可有助于提供精准化、阶梯化、个性化的治疗方案。目前,磁共振成像(MRI)是评估和诊断此类疾病的标准临床方法。通过对关节软骨、骨、滑膜、半月板等结构的定量分析,可以了解关节的形态学和结构学变化,如软骨退化、半月板损伤等,并评估疾病的严重程度。随着计算机算力、算法等软硬件水平的提升,以及医学影像、生物样本大数据时代的到来,人工智能在影像学组的应用特别是深度学习方法,已经在医学影像领域取得了显著成果[1]。人工智能技术为开展膝关节影像智能研究和膝骨关节炎智能评估提供了新思路,通过深度学习来改善图像质量用以辅助诊断也有许多研究。

作者单位: 315040 宁波,宁波市第六医院
通信作者: 林恒屹,Email:yzzxlhy@163.com

1 基本概述

1.1 影像组学概念 Lembin 等[2]在 2012 年首次提出了影像组学(Radiomics)的概念。影像组学是一种利用医学影像数据进行定量分析和模式识别的研究领域,它通过提取和分析医学影像中的特征,结合机器学习和统计学方法,来研究和预测疾病的发展、治疗效果和预后等方面的信息。影像组学可以帮助医生更准确地诊断疾病、评估疾病的严重程度和预测患者的治疗反应,为个体化医疗提供支持。

1.2 机器学习概念 机器学习是一种人工智能的分支领域,人工智能(artificial intelligence)是在 1956 年达特茅斯会议上麦卡锡首先提出的,它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。机器学习通过让计算机从数据中学习和提取模式,从而实现自主学习和预测能力的方法。它通过构建和训练模型,使计算机能够自动识别和理解数据中的模式和规律,并根据这些模式和规律做出决策或预测。机器学习广泛应用于各个领域,如图像识别、语音识别、

自然语言处理、推荐系统等，为人们提供了更智能、高效的解决方案。机器学习也并不是足够智能的，因为这个过程需要人类提供特征。

1.3 深度学习概念 深度学习是机器学习中的一个分支方法，避免了传统方法中需要人工提取特征的问题，不需要区域标注，通常定位也能够胜任。通过在训练过程中同时进行特征提取、选择和最终分类，从无数可能的规律中总结最显著、最合适的特征完成预测。

1.4 卷积神经网络（convolutional neural network，CNN） CNN 是一种深度学习模型，主要用于处理和分析具有网格结构的数据，是目前使用最多的深度学习算法之一，在医学影像领域的应用也越来越广泛。它通过使用卷积层、池化层和全连接层等组件来提取和学习图像中的特征，通过共用卷积核和上下采样等技术，大幅降低整个网络的参数量，提高网络的性能和效率[3]。

2 深度学习在膝关节 MRI 分析与处理领域中的研究与应用

近年对深度学习在影像组学领域的研究也在不断增多，其中 MRI 图像诊断的研究取得了一系列重要的进展。本文通过对美国国立卫生研究院（NIH）开发的数据库 Pubmed 平台 2021—2023 论文进行收集→筛选出 MRI 与深度学习相关文献→选择其中针对膝关节的研究文献→剔除部分综述性文献。通过对这些论文的归纳，可以大致了解深度学习在膝关节 MRI 影像最新的研究方向。研究方向大致分为以下几个方面。

2.1 基于 MRI 图像的组织智能分割研究 此类研究旨在开发出能够准确、快速地将 MRI 图像中的不同组织结构进行分割的算法，以提高医学影像诊断的准确性和效率。通过使用深度学习技术，研究人员可以训练模型来学习 MRI 图像中不同组织的特征，并自动进行分割，膝关节的研究主要包括软骨组织、骨组织、半月板韧带等结构区分。Hong 等[4]通过采用多个卷积层和全连接层结构的多路径 CNN 构建人工智能图像辅助模型，用于膝关节韧带和股神经进行准确的分割图像重建，ROC 曲线下的面积（*AUC*）为 0.838，敏感性为 0.800，特异性为 0.836。

Si 等[5]、Szoldán 等[6]、Zhang 等[7]、Chadoulos 等[8]分别基于 U-Net 深度学习模型、深度卷积神经网络、半监督学习（SSL）框架下两阶段多图谱方法等人工智能模型，进行 MRI 图像中膝关节软骨的分割，在戴斯相似性系数（dice similarity coefficient，DSC）、*AUC* 等评价指标上取得不错的成绩。更进一步的研究中，Khan 等[9]首次尝试在完全自动的情况下，使用多路径 CNN 和抠图（image matting）算法来建模膝关节 MRI 的语义分割，通过低秩张量分解和重构、自动静态图像抠图（trimap）算法和 alpha 抠图算法等技术，解决 CNN 模型缺乏图像特定的适应性（如组织对比度低和结构不均匀性）问题，在边界和形状一致性方面取得了更好的成效。

2.2 基于 MRI 图像的图像智能降噪及扫描序列优化 传统的扫描序列可能需要较长的时间来获取高质量的图像。通过使用人工智能技术，在图像后处理过程中人工智能技术可以通过图像重建和降噪算法来提高图像质量；也可以优化扫描序列的参数设置，从而提高扫描效率，减少扫描时间，减少运动伪影的发生。Fayad 等 [10] 使用修改后的基于 CNN 的 U-Net 来创建合成的脂肪抑制磁共振图像（AFSMRI），从单个非脂肪抑制的 PD 序列创建合成的脂肪抑制 MR 图像。AFSMRI 与传统的 3D MR 序列相比，在评估膝关节常见异常的诊断性能方面具有相似的检测率，但该序列扫描时间减少 54.5%。Kaniewska 等[11]运用螺旋桨采集技术（PROPELLER）与卷积神经网络重建的结合序列进行膝关节成像，该序列可以同时减少运动伪影、图像噪声和扫描时间，该序列能够将标准序列的平均采集时间减少 60%，在评估膝关节病理方面表现出优势，特别是对于评估髌骨软骨的缺陷和软骨剥离，在骨、脂肪和肌肉的信噪比和对比噪声比方面也表现出显著优势。Wang 等[12]、Kim 等[13]分别运用人工智能辅助压缩感知（artificial intelligence assisted compressed sensing，ACS）技术对膝关节 MRI 成像进行优化，利用深度学习增强和传统重建技术，研究并行成像（parallel imaging，PI）和同步多切片（SMS）加速成像的各种组合。两个团队的研究结果都证明了新型的 ACS 协议在图像质量上都表现出优越性，并且在减少一半的采集时间的同时（Wang 等缩短 56%，Kim 等缩短 47%），能够实现与结构异常的等效检测。Iuga 等[14]以标准脂肪饱和 2D 质子密度（proton density，PD）序

列为基础，结合压缩感知（compressed sensing，CS）和基于卷积神经网络的深度学习算法（CS-AI）的新型算法来加速膝关节的二维诊断 MRI 成像。研究结果显示，CS-AI 加速的图像在定性和定量方面都表现出优越的成像质量。Akai 等[15]同样进行人工智能-辅助压缩感知研究，团队使用了压缩感知与并行成像技术，在相位编码中使用随机欠采样，然后使用小波变换实现压缩感知以去除伪影。经过深度学习重建（deep learning reconstruction，DLR）优化后，扫描时间为 100 s 的优化图像在噪声、韧带和半月板的可视化以及整体图像质量方面均优于扫描时间 390 s 的优化前图像。

2.3　基于膝关节 MRI 图像的疾病辅助诊断研究

通过对膝关节 MRI 图像的分析和解读，可以帮助医生确定膝关节的病变类型、程度和位置，从而指导临床治疗和手术决策。研究涉及多种膝关节疾病，如半月板损伤、韧带损伤、滑膜炎等。通过对膝关节 MRI 图像的定量和定性分析，可以评估病变的程度、范围和严重程度，为医生提供更准确的诊断和治疗建议。Awan 等 [16] 使用 ResNet-14 卷积神经网络模型，并结合实时数据增强技术，用于三类 ACL 病变（健康、部分破裂和完全破裂）的检测，研究者采用混合类别平衡和实时数据增强的策略来解决 MRI 数据稀缺和类别不平衡的问题。根据实验结果，通过敏感性、特异性、精确度、召回率、F1 值、接收器操作特征曲线（ROC）和 *AUC* 等指标广泛验证，平均准确率、敏感性和精确度分别达到 92%、91%和 91%。Dunnhofer 等[17]利用 MRP Net 进行膝关节 MRI 成像辅助诊断，该模组由金字塔细节池的特征金字塔网络组成，其优点是可插入任何现有的基于 CNN 的诊断管道。通过插入不同模块如增强 CNN 的中间特征和详细信息捕捉等进行效果验证，在 ACL 撕裂和半月板撕裂的诊断方面都具有较高的准确性和敏感性，*AUC* 在 0.87 ～ 0.97。它能够更好地捕捉与这些损伤相关的特征，从而提高诊断的准确性。Zheng 等[18]运用基于低秩分解去噪的多模态 MRI 成像算法，在诊断膝关节骨关节炎和软骨病变方面的敏感性、特异性、准确性均较高，均超过 0.85，一致性稍低（0.73）。Cui 等 [19] 使用深度学习算法在便携设备上自动评估膝关节骨关节炎的严重程度，为便携设备上的自动化评估提供了新的可能性。Zhuang 等[20]设计了一个联合进行图卷积和图卷积的 CSNet 模型，用于评估软骨缺陷。CSNet 包含多个模型，如利用 2D U-Net 模型来提取局部外观特征，SubdivNet 模型用于处理三角网格中的 3D 形状，SDU-Net 模型用于处理球面网格中的皮层表面等。相比于其他方法，CSNet 模型考虑了软骨的曲面形状和相邻软骨之间的缺陷相关性，因此在性能上表现更好。CSNet 的准确率（ACC）为 87.4%，召回率（REC）为 79.5%，*AUC* 为 94.7%。

2.4　基于膝关节 MRI 图像的疾病风险预测研究

此类研究的相关文献较少，主要包括运动量、体质量控制、饮食习惯等因素的研究，或者探索早期干预和预防策略，预测膝关节疾病发展风险以延缓或预防膝关节疾病。Jamshidi 等[21]分别采取 DeepSurv 模型、线性多任务逻辑回归（MTLR）模型、神经网络 MTLR 模型等分析 MRI 图像中的特征，如骨髓病变（BMLs）、骨髓水肿等，预测膝关节骨关节炎（OA）是否需要全膝关节置换手术（TKR）以及何时需要进行手术，根据个性化治疗建议为医师提供指导。Ramkumar 等[22]运用逻辑回归、高斯朴素贝叶斯等机器学习模型来分析预测术前影像、术前患者报告的结果测量和患者人口统计学特征与术后 2 年临床意义差异和显著临床益处之间的关系，以评估膝关节软骨缺损患者进行骨软骨移植术后的功能和生活质量。这些模型在预测术后结果方面表现良好，其 *AUC* 在 0.60 ～ 0.91。Zech 等[23]基于 DenseNet121 深度学习模型，从膝关节 MRI 成像中自动推断小儿膝关节骨骼成熟度。

3　存在不足与未来展望

通过深度学习膝关节 MRI 图像完成图像分类、目标检测、图像分割、加速数据采集等任务已经取得初步效果，各项评价指标数据向好，但是仍然存在许多困难。（1）数据量不足，由于数据的获取和标注成本较高，很难获得足够的多样化和代表性的数据集，一些模型研究样本数量较少。数据可能出现模型过拟合，在训练集上表现良好但在测试集上表现较差。同时深度学习模型需要实时获取最新的数据进行训练和推理，最好能够接入医院系统实现数据实时更新训练。（2）模型泛化能力不足：膝关节 MRI 图像具有较大的变化和复杂性，例如不同扫描序列、不同病变

类型和不同解剖结构等。在面对新的、未见过的数据时，可能会出现泛化能力不足的问题，导致模型在实际应用中的性能下降。（3）数据标注准确性缺乏标准。膝关节 MRI 图像的标注通常需要专业医生的知识和经验，而且标注过程相对耗时和繁琐。人工标注就会存在主观性和标注误差的存在，而且大量的图片采取人工标注将耗费大量人力。未来研究也将针对智能分割区域、图像智能降噪和扫描序列优化、疾病辅助诊断等方向发展。通过数据增强、迁移学习、对抗训练、模型集成、强化学习、解释模型的决策过程和关键特征方面探索更多的深度学习模型和算法，追求数据的即时性，加强人工智能图像的鲁棒性，让模型更具有普适性，从而提高诊断的准确性和效率。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] 李顶,汪艳芳,李永欣,等.人工智能在医学影像诊断中的应用研究[J].中国临床解剖学杂志,2020,38(1):110-113.

[2] LAMBIN P, RIOS-VELAZQUEZ E, LEIJENAAR R, et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis[J]. Eur J Cancer, 2012, 48(4):441-446.

[3] SZEGEDY C, VANHOUCKE V, IOFFE S, et al. Rethinking the inception architecture for computer vision[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 2818-2826.

[4] HONG G, ZHANG L, KONG X, et al. Artificial Intelligence Image-Assisted Knee Ligament Trauma Repair Efficacy Analysis and Postoperative Femoral Nerve Block Analgesia Effect Research[J]. World Neurosurg, 2021, 149:492-501.

[5] SI L, XUAN K, ZHONG J, et al. Knee Cartilage Thickness Differs Alongside Ages: A 3-T Magnetic Resonance Research Upon 2,481 Subjects via Deep Learning[J]. Front Med (Lausanne), 2021,7: 600049.

[6] SZOLDAN P, EGYED Z, SZABOE, et al. Segmentation of knee cartilages in MR images with artificial intelligence[J]. Orv Hetil, 2021, 162(9):352-360.

[7] ZHANG Y, LIAN H, LIU Y. Deconstruction of Knee Cartilage Injury in Athletes Using MR Images Based on Artificial Intelligence Segmentation Algorithm[J].Contrast Media Mol Imaging, 2022, 2022:4165232.

[8] CHADOULOS C G, TSAOPOULOS D E, MOUSTAKIDIS S, et al. A novel multi-atlas segmentation approach under the semi-supervised learning framework: Application to knee cartilage segmentation[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022,227:107208.

[9] KHAN S, AZAM B, YAO Y, et al. Deep collaborative network with alpha matte for precise knee tissue segmentation from MRI[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022,222:106963.

[10] FAYAD L M, PAREKH V S, DE CASTRO LUNA R, et al. A Deep Learning System for Synthetic Knee Magnetic Resonance Imaging: Is Artificial Intelligence-Based Fat-Suppressed Imaging Feasible[J]. Invest Radiol, 2021, 56(6):357-368.

[11] KANIEWSKA M, DEININGER-CZERMAK E, LOHEZIC M, et al. Deep Learning Convolutional Neural Network Reconstruction and Radial k-Space Acquisition MR Technique for Enhanced Detection of Retropatellar Cartilage Lesions of the Knee Joint[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(14):2438.

[12] WANG Q, ZHAO W, XING X, et al. Feasibility of AI-assisted compressed sensing protocols in knee MR imaging: a prospective multi-reader study[J]. Eur Radiol, 2023,33(12):8585-8596.

[13] KIM M, LEE S M, PARK C, et al. Deep Learning-Enhanced Parallel Imaging and Simultaneous Multislice Acceleration Reconstruction in Knee MRI[J]. Invest Radiol, 2022,57(12):826-833.

[14] IUGA A I, RAUEN P S, SIEDEK F, et al. A deep learning-based reconstruction approach for accelerated magnetic resonance image of the knee with compressed sense: evaluation in healthy volunteers[J]. Br J Radiol, 2023,96(1146):20220074.

[15] AKAI H, YASAKA K, SUGAWARA H, et al. Acceleration of knee magnetic resonance imaging using a combination of compressed sensing and commercially available deep learning reconstruction: a preliminary study[J]. BMC Med Imaging, 2023, 23(1):5.

[16] AWAN M J, RAHIM M S M, SALIM N, et al. Efficient Detection of Knee Anterior Cruciate Ligament from Magnetic Resonance Imaging Using Deep Learning Approach[J]. Diagnostics, 2021, 11(1): 105.

[17] DUNNHOFER M, MARTINEL N, MICHELONI C. Improving MRI-based Knee Disorder Diagnosis with Pyramidal Feature Details[C]. Medical Imaging with Deep Learning (MIDL) 2021,2021.

[18] ZHENG Z, HE R, LIN C, et al. Multimodal Magnetic Resonance Imaging to Diagnose Knee Osteoarthritis under Artificial Intelligence[J]. Comput Intell Neurosci, 2022, 2022:6488889.

[19] CUI T, LIU R, JING Y, et al. Development of machine learning models aiming at knee osteoarthritis diagnosing: an MRI radiomics analysis[J]. J Orthop Surg Res, 2023, 18(1):375.

[20] ZHUANG Z, SI L, WANG S, et al. Knee Cartilage Defect Assessment by Graph Representation and Surface Convolution[J]. IEEE Trans Med Imaging,2023,42(2):368-379.

[21] JAMSHIDI A, PELLETIER J P, LABBE A, et al. Machine Learning-Based Individualized Survival Prediction Model for Total Knee Replacement in Osteoarthritis: Data From the Osteoarthritis Initiative[J]. Arthritis Care Res, 2021, 73(10):1518-1527.

[22] RAMKUMAR P N, KARNUTA J M, HAEBERLE H S, et al. Effect of Preoperative Imaging and Patient Factors on Clinically Meaningful Outcomes and Quality of Life After Osteochondral Allograft Transplantation: A Machine Learning Analysis of Cartilage Defects of the Knee[J]. Am J Sports Med, 2021, 49(8):2177-2186.

[23] ZECH J R, CAROTENUTO G, JARAMILLO D. Inferring pediatric knee skeletal maturity from MRI using deep learning[J]. Skeletal Radiol, 2022,51(8):1671-1677.

收稿日期：2023-10-15
（本文编辑：陈志翔）