

基于深度学习的骶髂关节炎 CT 图像识别方法

张雷

太原师范学院计算机科学与技术学院, 山西 晋中 030619

DOI:10.61369/MRP.2025100011

摘 要： CT作为诊断骶髂关节炎病发的重要方式，依赖人工判读，导致误诊和漏诊。为此，本研究提出一种融合2.5D切片输入、多尺度特征提取与融合的深度学习模型 MS-2.5D-Net。首先，选取包含骶髂关节中下段关节间隙的连续5层 CT 切片，构建2.5D输入，在保留三维上下文关联性的同时，降低计算复杂度；其次，修改模型首层卷积适配2.5D输入，在编码阶段嵌入空洞空间金字塔池化（ASPP）模块，同步提取关节间隙的局部微结构特征与全局形态学特征；最后，引入残差特征金字塔（RFPN）跨层融合高层语义与低层细节特征，缓解深层网络梯度消失问题。在29例样本数据集上的实验表明，该模型的敏感度为91.3%，特异性为95.2%，能有效应对骶髂关节炎判别难题，为临床辅助诊断提供了可靠的技术方案。

关 键 词： 骶髂关节炎；骨盆 CT；2.5D 切片；多尺度特征融合；深度学习

A CT Image Recognition Method for Sacroiliitis Based on Deep Learning

Zhang Lei

Department of Computer Science and Technology, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619

Abstract： CT is an important method for diagnosing sacroiliitis, but it relies on manual interpretation, leading to misdiagnosis and missed diagnosis. Therefore, this study proposes a deep learning model, MS-2.5D-Net, which integrates 2.5D slice input, multi-scale feature extraction and fusion. Firstly, five consecutive CT slices containing the middle and lower segments of the sacroiliac joint space are selected to construct 2.5D input, which retains the three-dimensional context correlation while reducing the computational complexity. Secondly, the first layer of the model's convolution is modified to adapt to 2.5D input, and the atrous spatial pyramid pooling (ASPP) module is embedded in the encoding stage to simultaneously extract the local microstructure features and global morphological features of the joint space. Finally, the residual feature pyramid network (RFPN) is introduced to fuse high-level semantic and low-level detail features across layers, alleviating the problem of gradient vanishing in deep networks. Experiments on a dataset of 29 cases show that the model has a sensitivity of 91.3% and a specificity of 95.2%, effectively addressing the challenge of sacroiliitis discrimination and providing a reliable technical solution for clinical auxiliary diagnosis.

Keywords： Sacroiliitis; pelvic CT; 2.5D slice; multi-scale feature fusion; deep learning

引言

骶髂关节炎作为中轴型脊柱关节炎的核心病理特征，其早期精准识别对延缓疾病进展、改善患者预后至关重要。目前，临床诊断主要依赖骨盆 CT 或 MRI 影像。然而传统影像分析方法易受主观因素干扰，导致诊断一致性较低^[1,2]。

近年来，医学图像分类在深度学习技术的推动下，分类精度不断提升，尤其是卷积神经网络（CNN）的应用，提高了分类效果和模型的泛化能力。Shenkman 等^[3]在2019年提出了首个完全根据 CT 影像自动化检测和分级骶髂关节炎的方法。2023年，Ke Zhang 等^[4]用改进的 nnU-Net 和 3D CNN 模型实现端到端的骶髂关节炎分级流程。2025年，杜涛，闫建红团队^[5]基于轻量化模型提出了 DI-MobileNet，以参数量较低的模型实现了高精度分类。由于骶髂关节的皮质骨与软骨下骨交界处形态不规则，普通二维卷积神经网络难以捕捉跨层空间关联性，而三维卷积的参数量远高于同等尺寸的2D卷积，在规模有限的数据集上，过高的参数量易导致模型过度拟合，

而非学习样本的关键特征。

基于以上分析,本文提出了多尺度特征融合的2.5D卷积神经网络 MS-2.5D-Net。2.5D切片替代传统单层2D切片作为输入,融合多相邻2D切片的3D上下文信息^[9],捕捉关节缝隙在轴向的连续性特征,在保留部分三维形态学特征的同时,相比三维卷积减少约40%的参数量^[7,8]。空洞空间金字塔池化通过生成不同扩张率的特征图^[9,10],来捕捉单一尺度难以捕捉的毫米级侵蚀边界和厘米级关节面整体形态特征。最后,通过构建跨层特征金字塔,将高层语义特征与多尺度输入特征逐元素相加,缓解梯度消失问题。

一、模型与方法

(一) MS-2.5D-Net模型架构

MS-2.5D-Net 采用2.5D输入编码、多尺度特征提取、动态融合、分类输出的流程,核心在于将传统2D网络的轻量化优势与3D上下文信息通过2.5D切片堆叠结合,并通过多尺度特征提取与动态融合模块强化细微炎症特征的判别能力。

编码器骨干网络基于 ResNet34改进,将原始首层2D卷积替换为三维卷积核,既捕获5层切片的初步三维上下文,又避免全3D网络的高参数量问题;后续层保留二维卷积操作,以维持较高的横向空间分辨率,聚焦于关节间隙的局部细节特征。

(二) ASPP模块

在 ResNet34的卷积层后嵌入空洞空间金字塔池化(ASPP)模块,生成扩张率分别为1, 3, 5, 7的多尺度特征图,以覆盖从骨侵蚀微结构到关节面整体形态的不同尺度感受野。 1×1 卷积保留原始分辨率,提取基础特征,后面分别使用扩张率为3、5、7的 3×3 空洞卷积获得尺度为 7×7 、 11×11 、 15×15 的感受野。然后全局平均池化分支生成全局上下文向量,通过 1×1 卷积上采样至原尺寸,所有分支特征经 1×1 卷积调整通道数后拼接,通过 3×3 卷积压缩冗余信息,输出多尺度特征 $F_1 \sim F_4$ 。每个阶段输出的特征图输入并行分支。

空洞卷积避免下采样导致的信息丢失,同时扩大感受野;全局分支补充全局语义信息,增强对小尺度侵蚀与大尺度变形的联合判别。

(三) RFPN模块

为解决骨干网络提取的多层级特征之间的互补性问题,本研究设计了残差特征金字塔网络(Residual Feature Pyramid Network, RFPN),通过自上而下的跨层级融合与残差连接,显式融合高层语义与低层细节信息,同时保留小样本数据下特征的稳定传递能力,为后续的疾病分类与病灶分割提供多尺度互补特征。具体来说,先将 F_{fused} 与高层语义特征通过残差连接逐级上采样,与低层特征逐元素相加,构建跨层特征金字塔,最终输出融合特征 F_{final} ,保留从局部细节到全局语义的完整信息。

(四) 输出层

计算每个类别切片在CT切片序列上的连贯性分数,结合切片分类在空间中的分布情况,给出预测结果。这种方法能够降低噪声切片的影响,增加模型的可靠性和准确度。

平均间隔指标计算预测连贯性:

$$AvgGap(C_j) = \frac{\sum_{i=1}^{N(C_j)-1} (d_{i+1} - d_i)}{N(C_j) - 1} \quad (1)$$

其中 C_j 表示类别, $j \in [0, 3]$, $N(C_j)$ 表示类别为 C_j 的切片数量, d_{i+1} 和 d_i 是两个相邻的同类切片的位置。

平均位置指标计算预测分布情况:

$$AvgPosition(C_j) = \frac{1}{N(C_j)} \sum_{i=1}^{N(C_j)} p_i \quad (2)$$

其中 p_i 表示类别为 C 的切片的位置。

最后加权分类:

$$C = \underset{C_j}{\operatorname{argmin}} \left(AvgGap(C_j) + \alpha \cdot AvgPosition(C_j) - \frac{N(C_j)}{2} \right) \quad (3)$$

α 是一个权重系数,用于调整平均位置接近中段的重要性相对于平均间隔的重要性。

二、实验与结果

相比传统2D模型, MS-2.5D-Net通过2.5D输入与多尺度融合将敏感度提升7.2%,特异性提升2.6%,显著优于单层切片分析。而3D全卷积模型的参数量激增、训练效率低,且小样本下易过拟合。

表1 各方法分类性

Table 1 classification performance by different methods

模型类型	输入类型	关键架构	敏感度	特异性	Dice系数	参数量 / M
2D-ResNet34 (Baseline)	单层2D切片	ResNet34 (2D卷积)	84.1%	92.6%	0.79 ± 0.03	25.3
3D-ResNet34	5层3D切片堆叠	全3D卷积 (3×3×3核)	85.3%	93.1%	0.81 ± 0.04	68.7
2.5D-ResNet34 (单尺度)	5层2.5D切片	首层3×3×3 3D卷积 + ResNet34 (2D)	86.7%	93.8%	0.83 ± 0.03	27.1
Ours	5层2.5D切片	2.5D输入 + ASPP多尺度 + RFPN	91.3%	95.2%	0.88 ± 0.02	30.2

三、总结与展望

本研究针对骨盆 CT 影像中骶髂关节炎识别面临的关键挑战，提出了 MS-2.5D-Net 模型，为骶髂关节炎的早期精准识别提供了

新的技术路径。通过对比实验进一步佐证了设计的有效性，尤其在医疗资源受限的小样本场景下具有重要的临床推广价值。

参考文献

[1] Salaffi F .Imaging of Sacroiliac Pain: The Current State-of-the-Art[J].Journal of Personalized Medicine, 2024, 14.DOI:10.3390/jpm14080873.

[2]王庆文, 曾庆余, 肖征宇, 等. 磁共振成像对早期骶髂关节炎的诊断价值研究 [J]. 中华风湿病学杂志, 2006, 10(7):4.DOI:10.3760/j.issn:1007-7480.2006.07.001.

[3] Shenkman Y, Qutteineh B, Joskowicz L, et al. Automatic detection and diagnosis of sacroiliitis in CT scans as incidental findings[J]. Medical image analysis, 2019, 57: 165-175.

[4] Van Den Berghe, Thomas, et al. Neural network algorithm for detection of erosions and ankylosis on CT of the sacroiliac joints: multicentre development and validation of diagnostic accuracy[J]. European radiology 2023, 33: 8310-8323.

[5]杜涛, 闫建红. DI-MobileNet: 基于轻量化网络的骶髂关节炎识别方法 [J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(02):138-143.DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24102205.

[6] Xing Y, Wang J, Zeng G .Malleable 2.5D Convolution: Learning Receptive Fields along the Depth-axis for RGB-D Scene Parsing[J]. 2020.DOI:10.1007/978-3-030-58529-7_33.

[7] Tran D, Ray J, Shou Z, et al.ConvNet Architecture Search for Spatiotemporal Feature Learning[J]. 2017.DOI:10.48550/arXiv.1708.05038.

[8] Xing Y, Wang J, Zeng G .Malleable 2.5D Convolution: Learning Receptive Fields along the Depth-axis for RGB-D Scene Parsing[J]. 2020.DOI:10.1007/978-3-030-58529-7_33.

[9] Yang M, Yu K, Zhang C, et al.DenseASPP for Semantic Segmentation in Street Scenes[J]. 2018.DOI:10.1109/CVPR.2018.00388.

[10]万黎明, 张小乾, 刘知贵, 等. 基于空洞空间金字塔池化和多头自注意力的特征提取网络 [J]. 计算机应用, 2022, 42(S2):79-85.