

• 临床研究 •

双视图融合网络在青少年特发性脊柱侧弯中的应用

陆青青, 张哲昊, 胡婷婷, 周丹丹, 叶贤旺

【摘要】目的 比较双视图融合网络(DVFNet)与单视图聚焦椎体的地标检测网络(VFLDNet)评估青少年特发性脊柱侧弯(AIS)的性能。**方法** 收集 2022 年 1 月至 2024 年 6 月宁波大学附属第一医院收治的 AIS 患者 100 例,以人工测量为“金标准”,评估 DVFNet 与 VFLDNet 预测 Cobb 角、顶椎(AV)位置、胸椎后凸角(TK)和腰椎前凸角(LL)的准确性。**结果** 在 Cobb 角预测方面,VFLDNet 和 DVFNet 的平均绝对误差分别为 2.53° 及 2.74° ;严重程度分级时,两者均与人工测量具有高度一致性($Kappa=0.75, 0.72$, 均 $P < 0.05$)。在预测 AV 位置方面,DVFNet 的准确性(90.00%)明显高于 VFLDNet(84.00%)($P < 0.05$)。预测 TK 时,VFLDNet 预测值显著高于人工测量结果($P < 0.05$),且两个网络间的差值平均值差异有统计学意义($P < 0.05$)。对于 LL 的预测,DVFNet、VFLDNet 与人工测量的 $Kappa$ 值分别为 0.61、0.58。**结论** VFLDNet 易高估 TK,DVFNet 在 AV 位置识别和脊柱前后凸预测上有优势。

【关键词】 青少年特发性脊柱侧弯;人工智能

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2024.11.011

【中图分类号】 R682.3 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-0800(2024)11-1442-04

青少年特发性脊柱侧弯(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)典型表现为脊柱在冠状面上呈现不明原因的异常侧向弯曲,往往伴随椎体旋转,严重影响患者的身心健康和生活质量^[1]。AIS 的精准诊断高度依赖于高质量的影像学检查,特别是站立位全脊柱 X 线片,然而传统的人工测量方法不仅耗时费力,且易受观察者主观因素及经验水平的影响,导致测量结果的变异性和不确定性增加^[2-3]。

随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的飞速发展及其在医学领域的广泛应用,深度学习算法在 AIS 影像学评估中展现出巨大潜力^[4-5]。当前多数研究聚焦于利用前后位(anteroposterior, AP)X 线图像进行 Cobb 角的自动化测量,关键点模型-聚焦椎体的地标检测网络(vertebra-focused landmark detection network, VFLDNet)是其中代表性的方法之一。VFLDNet 创新性地利用关键点识别方法定位椎体的中心及其关键点地标,并基于此计算 Cobb 角,但该方法对脊柱侧位(lateral, LAT)X 线图像的评估尚未探索。由于 LAT X 线图像中脊柱受胸腔

软组织、器官及上肢遮挡,仅依赖 LAT 单视图进行关键点自动定位的精度显著受限。有研究证实,矢状面弧度变化与脊柱旋转稳定性及冠状面侧弯程度之间存在潜在联系^[6],提示了多视图融合分析在提升诊断精度方面的可行性。本研究提出一种基于脊柱双视图融合网络(dual-view fusion network, DVFNet),该方法与 VFLDNet 类似,亦为识别关键点的方法,但融合了脊柱 AP 与 LAT X 线图像,可实现信息互补,提高脊柱侧弯评估的精度与鲁棒性。本研究拟对比 DVFNet 与 VFLDNet 评估 AIS 的表现,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 收集 2022 年 1 月至 2024 年 6 月宁波大学附属第一医院收治的行站立位全脊柱 X 线检查 AIS 患者。纳入标准:(1)年龄 10 ~ 18 岁;(2)全脊柱 X 线检查包含清晰的 AP 及 LAT 图像,确保胸腰椎椎体明确识别;(3)无其他严重疾病史,未接受过脊柱相关手术。排除标准:(1)X 线片图像因异物遮挡或伪影干扰,导致脊柱形态无法准确观察者;(2)既往有脊柱手术史者。依据上述标准,最终筛选出 AIS 患者 100 例,其中男 26 例,女 74 例;年龄 10 ~ 18 岁,中位年龄 14.5 (13.0, 16.0) 岁。本研究获得宁波大学

作者单位: 315100 宁波,宁波大学附属第一医院(陆青青、张哲昊、叶贤旺);宁波大学信息科学与工程学院(胡婷婷、周丹丹)

通信作者: 叶贤旺, Email: 25636061@qq.com

附属第一医院医学伦理委员会批准,免除/豁免知情同意。

1.2 检查方法 全脊柱 X 线检查采用数字化 X 线成像系统(联影 uDR 780i、佳能 CXDI)。在 AP 拍摄时,患者站立于检查板前,背部紧贴板面,双臂自然下垂于身体两侧,双眼平视前方,双脚分开与肩同宽,双膝关节自然伸直;LAT 拍摄时,患者双眼平视前方,双肘屈曲上抬至胸前,以避免上肢与脊柱重叠影响观察。球管电压根据患者体型及拍摄需求,设定在 70 ~ 120 kV 范围内,电流则采用自动调节模式。所有图像均通过图像存储与传输系统以 jpg 格式匿名导出,并进行预处理。每幅图像被精确裁剪,确保最终图像仅包含胸腰椎区域,便于后续分析与评估。

1.3 VFLDNet^[7] 和 DVFNet^[8] VFLDNet 是基于单视图的网络架构,以 ResNet34 为骨干网络,通过编码器-解码器结构提取并融合高低层特征,同时通过引入跳跃连接和角点偏移解码机制,实现了对 X 线图像中脊椎中心及其关键点地标的精准定位。DVFNet 通过同时处理双视图(AP 和 LAT) X 线图像,利用增强的 U-Net 架构深入捕捉局部细微特征,并借助自注意力机制跨空间尺度建模全局上下文信息,实现了局部与全局特征的智能融合与自适应调整。

1.4 主弯和脊柱前后凸的评估 评价指标包括主弯的 Cobb 角、顶椎(apical vertebrae, AV)位置、胸椎后凸角(thoracic kyphosis, TK)和腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL)^[9]。

Cobb 角定义为 AP X 线片上最大弯头尾两端最倾斜椎体上下终板平行线之间的夹角;根据 Cobb 角对 AIS 进行分型, $< 10^\circ$ 为正常, $10^\circ \sim < 20^\circ$ 为轻度, $20^\circ \sim < 40^\circ$ 为中度, $\geq 40^\circ$ 为重度。AV 为侧弯曲线的顶点,即最大弯中旋转最显著、偏离中轴线最远的椎体;根据 AV 位置,AIS 分为胸弯($T_2 \sim T_{11/12}$)、胸腰弯($T_{12} \sim L_1$)、腰弯($L_{1/2} \sim L_4$)。TK 定义为 LAT X 线片上 T_5 椎体上终板与 T_{12} 椎体下终板连线之间的夹角(正常值 $20^\circ \sim 40^\circ$)。LL 定义为 LAT X 线片上 L_1 椎体上终板与 L_5 椎体下终板连线之间的夹角(正常值 $20^\circ \sim 45^\circ$)。

将 AP 和 LAT 图像分别输入至经过严格训练的 DVFNet 与 VFLDNet 模型中,模型自动检测并精确标记关键点,最终计算输出上述参数的结果。同时,采用双盲法邀请两位资深放射科医生分别独立测量并交叉验证,以两位医师测量的平均值(共识评分)作为“金标准”。当结果出现显著分歧时,通过讨论

与协商达成共识。

1.5 统计方法 数据使用 SPSS 26.0 软件分析,计量数据正态分布采用均数标准差表示,采用 t 检验;偏态分布以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,采用 Wilcoxon 秩和检验。计数资料用频率或百分比表示,采用 χ^2 检验。采用平均绝对误差(MAE)、Spearman 相关系数、组内相关系数(ICC)^[10]、Kappa 检验^[11]、Bland-Altman 分析、精确度和召回率来比较两个模型预测值与共识评分的差异。MAE 定义为预测值和实际值之间绝对差的平均值。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 Cobb 角评估 DVFNet、VFLDNet 预测的 Cobb 角与共识评分差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$),VFLDNet 预测的 Cobb 角显著低于 DVFNet ($Z=4.84, P < 0.05$),见表 1 及图 1。

在 Cobb 角预测方面,VFLDNet 和 DVFNet 的 MAE 分别为 2.53° 、 2.74° ;严重程度分级时,两者均与人工测量具有高度一致性($Kappa=0.75, 0.72$, 均 $P < 0.05$)。

2.2 AV 位置 DVFNet、VFLDNet 预测的 AV 与共识评分差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。DVFNet 预测准确率达 90.00%,显著优于 VFLDNet 的 84.00% ($P < 0.05$),见表 1。

预测主弯位置分型上,VFLDNet 误将 23.08% 的腰弯判为胸腰弯,而 DVFNet 仅误判 11.54%,DVFNet 与共识评分几乎完全一致($Kappa=0.85, P < 0.05$),而 VFLDNet 与共识评分仅为高度一致($Kappa=0.76, P < 0.05$),见表 2。

2.3 TK 和 LL 评估 DVFNet、VFLDNet 预测的 TK 和 LL 与共识评分均表现出强正相关性($r=0.91 \sim 0.94$, 均 $P < 0.05$)。VFLDNet 预测的 TK 值显著高于共识评分及 DVFNet(均 $P < 0.05$),见表 1 及图 1。

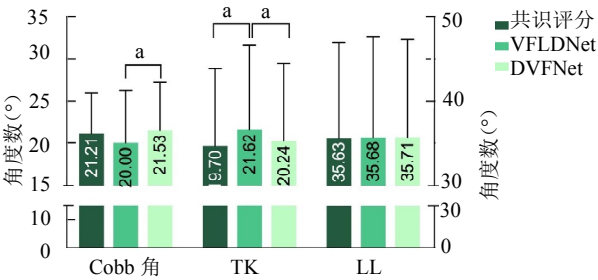
在预测精度上,DVFNet 的 TK 和 LL MAE 分别为 3.29° 、 3.05° ,VFLDNet 的 MAE 分别为 3.49° 、 3.44° 。在预测 TK 的差值上,VFLDNet 的差值平均值为 $(-1.92 \pm 3.92)^\circ$,与 DVFNet 的差值平均值 $(-0.54 \pm 4.00)^\circ$ 差异有统计学意义($t=3.70, P < 0.05$)。

在一致性检验方面,两者均与共识评分有极好的信度($ICC=0.90 \sim 0.94$, 均 $P < 0.05$);VFLDNet 预测的 LL 与共识评分中度一致($Kappa=0.58, P <$

表 1 DVFNet、VFLDNet 和共识评分评估结果

参数	DVFNet	VFLDNet	共识评分
Cobb 角(°)	21.52(16.10, 27.27)	20.00(15.79, 26.24)	21.21(17.00, 26.00)
严重分度(例)			
正常	0	1	0
轻度	42	49	43
中度	55	48	54
重度	3	2	3
顶椎位置	10.5(8.0, 13.0)	10.5(8.0, 13.0)	10.5(8.0, 13.5)
部位(例)			
胸弯	53	52	52
胸腰弯	26	30	22
腰弯	21	18	26
胸椎后凸角(°)	20.24±9.21	21.62±9.98	19.70±9.17
分型(例)			
< 20°	53	49	55
20°~40°	46	48	43
> 40°	1	3	2
腰椎前凸角(°)	35.71±11.55	35.68±12.00	35.63±11.33
分型(例)			
< 20°	11	10	10
20°~45°	70	66	70
> 45°	19	24	20

注:顶椎位置以数字 1~17 依次编号 T₁~L₅



注:TK 为胸椎后凸角,LL 为腰椎前凸角。TK 参考左侧 Y 轴,LL 参考右侧 Y 轴,a P < 0.05

图 1 DVFNet、VFLDNet 和共识评分比较

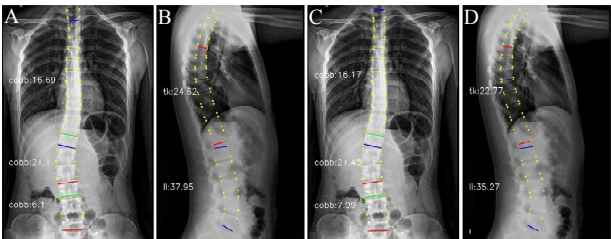
0.05), 而 DVFNet 达高度一致 ($Kappa=0.61$, P < 0.05)。典型示例见图 2。

3 讨论

单视图 AI 方面,Ha 等^[2]使用 Faster R-CNN Resnet-101 模型分割椎体来预测 Cobb 角, 相关系数为 0.95,MAE 为 5.46°。双视图 AI 方面,Galbusera 等^[12]利用全卷积神经网络预测 Cobb 角,标准误差高达 9.9°,差值平均值-5.1°。基于单、双视图的 AI 模型在 Cobb 角预测上差异不明显,与本研究结果类似。值得注意的是,尽管本研究中 VFLDNet 在定量预测上与共识评分偏倚更小,但在进行侧弯严重程度分类时,两者均与共识评分具有高度一致性。这可能是因为两个模型 MAE 差值仅为 0.21°,且差异无统计学意义 (P > 0.05),也可能因为差异未显著集中于分类决

表 2 DVFNet、VFLDNet 预测主弯位置分型比较 例(%)

参数	DVFNet		VFLDNet	
	精确	召回	精确	召回
胸弯	50/53(94.34)	50/52(96.15)	48/52(92.31)	48/52(92.31)
胸腰弯	21/26(80.77)	21/22(95.45)	21/30(70.00)	21/22(95.45)
腰弯	20/21(95.24)	20/26(76.92)	16/18(88.89)	16/26(61.54)



注: AV 为顶椎, TK 为胸椎后凸角; LL 为腰椎前凸角。A~B 为 VFLDNet 预测结果,主弯 Cobb 角为 21.10°,AV 为 L₁,TK 为 24.62°,LL 为 37.95°;C~D 为 DVFNet 预测结果,主弯 Cobb 角为 21.45°,AV 为 L₂,TK 为 22.77°,LL 为 35.27°;共识评分结果主弯 Cobb 角为 22.05°,AV 为 L_{1/2},TK 为 20.79°,LL 为 31.72°

图 2 DVFNet、VFLDNet 预测示例

策的关键阈值区域,故未对分级造成影响。

本研究进一步证实了基于双视图的 AI 模型在预测脊柱前后凸方面的优越性,其准确性明显优于基于单视图的模型,这一发现与先前的研究结果相一致。2018 年,Wu 等^[13]首次提出了多视图关联网(MVC-Net),通过设计交互卷积层来合并 AP 及 LAT X 线视图的联合特征,有效减轻了遮挡问题,其 AP 和 LAT Cobb 角估计误差分别为 4.04°和 4.07°,展现了多视图特征算法的显著优势。随后,Wang 等^[14]

提出交叉与并行结构的多视图外推网络 MVE-Net, 但可能由于较大的样本量及不同程度侧弯 ($0 \sim 96.33^\circ$) 的挑战, 其 AP 和 LAT X 线预测的 MAE 分别为 7.81° 和 6.26° , 相较于 MVC-Net, 性能提升并不显著。Zhang 等^[15]设计的 MPF-net 多任务网络, 则通过结合椎体预测、地标预测及相邻椎体信息, 成功融合了 AP 和 LAT 双视图图像, 特别是在 LAT X 线图像上可准确识别被胸腔和手臂隐藏的椎体, 从而实现高精度的脊柱前后凸的预测, 在 AP 和 LAT X 线图像上的 MAE 分别为 3.52° 和 4.05° , 显著优于前述方法。然而, 这些研究大多侧重于单一的局部或全局特征。相比之下, 本研究采用的 DVFNet 通过结合基于双视图的局部增强编解码结构与全局自注意力特征提取, 并辅以加权特征融合策略, 实现了对全局及局部信息的全面兼顾, 从而进一步提升了脊柱关键点的检测准确性。

本研究结果显示, 两种模型均能有效预测 AV 位置, 差异值在 1 个椎体内。但两种模型均存在将腰弯错误归类为胸腰弯的倾向, 特别是 VFLDNet, 其错误率高达 23.08%, 而 DVFNet 错误率仅为 11.54%, 误判主要集中在 L_1 椎体附近。造成该现象可能源于 AI 模型与人工评价方式之间的差异: AI 模型主要通过计算椎体中心点的偏移度来进行预测, 其输出结果严格局限于椎体本身; 而人工测量时往往会将椎间盘纳入考虑范围, 导致两者在判断脊柱弯曲类型时产生分歧。当前, 多数研究聚焦于侧弯角度的测量, 而对于 AV 的深入探讨仍显不足。Wu 等^[16]学者研发的 MSE-Net 在 AV 预测方面取得了较高的准确性 (85.71%) 和召回率 (93.38%)。Wang 等^[17]则更进一步, 利用两阶段迁移学习策略实现了 AV 旋转度进展的预测。与之相比, 本研究中的 DVFNet 在准确性上达到了 90.00%, 且预测 TK 的召回率高达 96.15%, 显示出其在这一领域的优越性能。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 陆青青、张哲昊: 实验操作、论文撰写; 胡婷婷、周丹丹: 实验操作、数据整理、统计学分析; 叶贤旺: 研究指导、论文修改

参 考 文 献

- [1] WEINSTEIN S L, DOLAN L A, CHENG J C, et al. Adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Lancet*, 2008, 371(9623): 1527-1537.
- [2] HA A Y, DO B H, BARTRET A L, et al. Automating scoliosis

- measurements in radiographic studies with machine learning: Comparing artificial intelligence and clinical reports[J]. *J Digit Imaging*, 2022, 35(3): 524-533.
- [3] LODER R T, URQUHART A, STEEN H, et al. Variability in Cobb angle measurements in children with congenital scoliosis[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1995, 77(5): 768-770.
- [4] CHENG J C, CASTELEIN R M, CHU W C, et al. Adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2015, 1: 15030.
- [5] 项林奕, 朱津博, 葛依婷, 等. 人工智能技术在脊柱侧凸诊疗中的应用进展[J]. *中华骨科杂志*, 2022, 42(6): 388-394.
- [6] KUBAT O, OVADIA D. Frontal and sagittal imbalance in patients with adolescent idiopathic deformity[J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(2): 29.
- [7] YI J R, WU P X, HUANG Q Y, et al. Vertebra-focused landmark detection for scoliosis assessment[C]//2020 IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). April 3-7, 2020, Iowa City, IA, USA. IEEE, 2020: 736-740.
- [8] ZHOU D D, GUO L J, ZHANG R, et al. A dual-view fusion network for automatic spinal keypoint detection in biplane X-ray images[C]//2023 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM). December 5-8, 2023, Istanbul, Turkey. IEEE, 2023: 1792-1797.
- [9] MENG N, CHEUNG J P Y, WONG K K, et al. An artificial intelligence powered platform for auto-analyses of spine alignment irrespective of image quality with prospective validation[J]. *E Clinical Medicine*, 2022, 43: 101252.
- [10] KOO T K, LI M Y. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research[J]. *J Chiropr Med*, 2016, 15(2): 155-163.
- [11] XIONG Y Y, HUANG C C, FISHER M, et al. Comparison of automated CT perfusion softwares in evaluation of acute ischemic stroke[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2019, 28(12): 104392.
- [12] 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.
- [13] WU H B, BAILEY C, RASOULINEJAD P, et al. Automated comprehensive Adolescent Idiopathic Scoliosis assessment using MVC-Net[J]. *Med Image Anal*, 2018, 48: 1-11.
- [14] WANG C J, NI M, TIAN S, et al. Deep learning model for measuring the sagittal Cobb angle on cervical spine computed tomography[J]. *BMC Med Imaging*, 2023, 23(1): 196.
- [15] ZHANG K L, XU N F, GUO C Y, et al. MPF-net: An effective framework for automated Cobb angle estimation[J]. *Med Image Anal*, 2022, 75: 102277.
- [16] WU C, MENG G D, LIAN J, et al. A multi-stage ensemble network system to diagnose adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(9): 5880-5889.
- [17] WANG H F, ZHANG T, CHEUNG K M, et al. Application of deep learning upon spinal radiographs to predict progression in adolescent idiopathic scoliosis at first clinic visit[J]. *E Clinical Medicine*, 2021, 42: 101220.

收稿日期: 2024-09-25

(本文编辑: 钟美春)