

基于 KAN 增强 YOLOv10 的脊柱弯曲异常智能筛查系统研究

徐中一, 冯立华, 张颖, 孟子轩, 孟凡书
山东外国语职业技术大学, 山东 日照 276800
DOI: 10.61369/TACS.2026070043

摘要 : 针对脊柱弯曲异常传统筛查方式主观性强、漏诊率高、智能化不足等问题, 本文以 YOLOv10 为基础框架, 研究融合 KAN 网络的脊柱侧弯智能筛查协同设计方案。嵌入 KAN 模块可强化细微椎体非线性特征提取能力, 一体化结构减少测量误差, 轻量化改造实现 CPU 端落地运行。研究成果可为脊柱弯曲异常安全高效智能筛查提供技术参考。

关键词 : 脊柱弯曲异常; YOLOv10; KAN 网络; 关键点检测; Cobb 角测量; 轻量化模型

Research on an Intelligent Screening System for Spinal Curvature Abnormalities Based on KAN-Enhanced YOLOv10

Xu Zhongyi, Feng Lihua, Zhang Ying, Meng Zixuan, Meng Fanshu
Shandong Vocational University of Foreign Languages, Rizhao, Shandong 276800

Abstract : In response to the issues of high subjectivity, high missed diagnosis rate, and insufficient intelligence in traditional screening methods for spinal curvature abnormalities, this paper studies a collaborative design scheme for intelligent scoliosis screening based on the YOLOv10 framework integrated with the KAN network. Embedding the KAN module can enhance the ability to extract subtle nonlinear features of vertebrae, the integrated structure reduces measurement errors, and the lightweight transformation enables deployment on CPU. The research results can provide a technical reference for safe, efficient, and intelligent screening of spinal curvature abnormalities.

Keywords : spinal curvature abnormality; YOLOv10; KAN network; keypoint detection; Cobb angle measurement; lightweight model

引言

在脊柱健康筛查领域, 脊柱弯曲异常是青少年高发骨科病症^[9], 传统筛查手段已经难以适配大规模体检需求。临床目视筛查主观性突出、轻度侧弯漏检严重; X 线拍片测量 Cobb 角作为诊断金标准^{[8][10]}, 存在电离辐射、依赖资深医师、筛查效率偏低等短板。

现阶段深度学习逐步应用于脊柱影像检测, 但现有算法仍存有短板: 传统 MLP 与 CNN 提取椎体细微形变特征能力有限, 小角度侧弯易漏检; 多数模型体量庞大, 必须依托 GPU 运行, 基层医疗机构无法落地; 检测、测角分步执行, 误差逐级累积, 测量精度受限。

因此, 融合 KAN 与 YOLOv10 搭建轻量化智能筛查模型, 实现关键点定位与 Cobb 角同步预测, 成为脊柱智能化筛查领域的研究重点。本文围绕模型协同架构设计开展研究, 助力脊柱筛查智能化落地。

一、本文主要贡献

本文主要贡献可概括如下:

(1) 提出一种融合 KAN 的 YOLOv10 脊柱弯曲异常智能筛查框架。通过将原始 C2F 模块中的 MLP 组件替换为 Kolmogorov-Arnold 网络 (KAN), 提升了模型对细微椎体非线性特征的提取能力。

(2) 设计了一种一体化多任务检测架构, 联合实现椎体关键点定位与 Cobb 角估计, 消除了传统分步测量流程带来的累积误差。

(3) 提出了一种角度敏感复合损失函数, 增强模型对轻度侧

弯样本的学习性能, 提高 Cobb 角回归精度。

(4) 引入了一种结合深度可分离卷积、结构重参数化、INT8 量化、知识蒸馏与难例挖掘的轻量化部署策略, 实现在常规 CPU 设备上的高效推理。

(5) 实验结果表明, 所提框架在椎体检测精度与 Cobb 角估计性能方面均优于基线方法, 同时保持了实用的部署效率。

二、脊柱筛查相关技术与指标概述

(一) YOLOv10 目标检测算法

YOLOv10 是兼顾精度与实时性的新一代检测算法^[1], 通过精

简主干网络、优化检测头与非极大抑制算法，在检测准确率和推理速度之间实现平衡。原生轻量化的网络结构，适配医学影像关键点定位任务，为模型轻量化部署至低算力 CPU 设备奠定硬件适配基础。

（二）KAN 网络基本原理

KAN (Kolmogorov - Arnold Network) 通过使用可学习的样条激活函数替代传统 MLP 中的固定激活函数^[5]，并借助 B 样条基函数对数据中的非线性模式进行自适应建模^[6]。相比传统全连接 MLP，KAN 在细粒度特征提取、微小形态变化表征以及小样本学习任务中具有更强的非线性拟合能力^{[5][7]}，因此能够更有效地捕捉椎体边缘的细微变形和复杂的不规则结构特征。其数学表达式为^[5]：

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q \left(\sum_{p=1}^n \phi_{q,p}(x_p) \right)$$

其中， x_p 为输入变量， $\phi_{q,p}(\cdot)$ 与 $\Phi_q(\cdot)$ 为可学习的非线性映射函数。该表达式来源于 Kolmogorov-Arnold 表示定理，其核心思想是利用多个一元函数的组合来逼近任意连续多元函数。基于这一理论，KAN 采用可学习样条函数替代传统 MLP 中固定形式的激活函数，从而增强模型对复杂非线性关系的表达能力。在脊柱影像分析任务中，KAN 能够更有效地捕捉椎体边缘细微变形及局部结构差异，为后续关键点定位与 Cobb 角测量提供更加丰富的特征表示^[5]。

（三）Cobb 角临床判定标准

Cobb 角是脊柱侧弯诊断与分级中最常用且最重要的定量评价指标^{[8][9][10]}。在脊柱正位 X 线影像中，通过确定侧弯节段的上端椎和下端椎，测量其终板倾斜方向，并计算两者垂线之间的夹角，即可获得 Cobb 角^{[8][10]}。其计算公式如下：

$$\theta = |\alpha - \beta|$$

其中， α 和 β 分别表示上端椎和下端椎终板的倾斜角。所得角度 θ 作为脊柱侧弯诊断、病情分级及疗效评估的重要依据，在临床实践中被广泛应用。

（四）特征增强与轻量化的关联性

脊柱筛查模型中，特征增强与轻量化优化相互制约、相辅相成；KAN 提升细微特征提取精度，但会小幅增加参数量；各类轻量化手段能够缩减算力开销、适配 CPU 部署，但压缩过度会造成特征丢失、精度下滑。二者协同平衡设计，是实现高精度、轻量化筛查模型的必要条件。

（五）与现有方法的比较

近年来，基于深度学习的脊柱弯曲筛查方法取得了显著进展。传统卷积神经网络 (CNN) 方法虽能提取椎体特征，但对细微非线性椎体变形的建模能力有限，往往导致对轻度侧弯病例的敏感性降低。

YOLO 系列检测框架在检测效率与定位精度方面实现了显著提升^{[1][3][4]}。特别是 YOLOv10 引入了兼顾精度与实时性的端到端检测范式。然而，原始 YOLOv10 架构的特征提取模块仍依赖传统 MLP 结构，难以充分捕捉复杂的非线性椎体特征。

此外，基于分割的方法主要关注椎体轮廓提取，通常需要额外的后处理步骤来计算 Cobb 角。此类多阶段工作流程可能引入累积误差并增加计算复杂度。

相较于现有方法，本文提出的 KAN 增强 YOLOv10 框架将特征增强、椎体关键点定位与 Cobb 角估计集成于统一架构中。通过引入 KAN 的非线性表征能力并采用多任务检测策略，所提方法在提升细微椎体特征提取能力的同时，有效降低了测量误差与计算成本。

三、KAN 增强 YOLOv10 智能筛查模型协同设计方案

（一）整体协同架构设计

整套模型协同架构由三大核心模块组成：KAN 特征增强模块、多任务检测测角模块、轻量化落地实现模块，各模块联动完成特征提取、目标检测、角度测算与模型压缩全流程。

第一，KAN 特征增强模块：是提升椎体细粒度特征提取的基础防线，依托 KAN 非线性拟合优势，弥补原有 C2F 模块中 MLP 特征提取短板，为关键点定位、角度回归提供优质特征图谱。

第二，多任务一体化检测模块：是智能测算的核心单元，采用双分支并行检测头架构，同步完成椎体关键点坐标输出、Cobb 角直接回归，摒弃分步测算模式，从架构层面规避分步运算带来的误差累积。

第三，轻量化实现模块：是模型落地的关键纽带，串联前两大功能模块，通过多类轻量化算法压缩模型体积、加快推理速度，保障优化后的模型可在普通 CPU 设备上稳定运行。

模型完整拓扑结构如图 1 所示。



图 1 KAN 增强 YOLOv10 脊柱弯曲异常筛查模型整体架构

（二）KANSpine 特征增强机制设计

为提升 YOLOv10 原生 C2F 模块的特征表达能力，本文将内部的多层感知机 (MLP) 替换为 Kolmogorov - Arnold Network (KAN)，并设计了一种双分支特征增强模块——KANSpine。该模块的主分支采用 3×3 深度可分离卷积提取椎体的全局空间轮廓特征，以增强对整体脊柱结构信息的建模能力；辅助分支则利用 KAN 的自适应非线性映射能力，学习椎体边缘的细微形变及复杂非线性特征。两个分支的输出在通道维度进行拼接并融合，形成更加丰富的特征表示。在仅增加少量参数的前提下，该模块能够有效提升模型对小 Cobb 角轻度脊柱侧弯病变的识别能力。

从结构上看，KANSpine 模块采用双分支协同设计。主分

支负责提取全局轮廓与结构信息，辅助分支负责捕获局部边界变化和细粒度形态特征。通过对两类特征进行融合，模型不仅能够保持对整体脊柱结构的感知能力，还能够增强对局部异常区域的表征效果，从而提高对轻度脊柱侧弯异常的检测灵敏度和诊断准确性。

（三）一体化检测测量机制设计

检测头采用多任务并行优化架构，不再拆分关键点标注、几何算角两个步骤，双分支同时输出关键点坐标与 Cobb 角预测值。

设计角度敏感复合损失函数完成联合反向传播优化。总损失公式如下：

$$L_{total} = \lambda_1 \cdot L_{kpt} + \lambda_2 \cdot L_{cobb} + \lambda_3 \cdot L_{cos_angle}$$

L_{kpt} 为关键点定位损失， L_{cobb} 为 Cobb 角回归损失， L_{cos_angle} 为角度余弦相似度损失， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为各项损失权重系数，强化模型对小角度弯曲样本的学习效果，提升测角精准度。

（四）模型轻量化实现机制设计

采用多技术组合轻量化方案，在控制精度损耗的前提下压缩模型：一是深度可分离卷积替换标准卷积，削减参数量与浮点运算量；二是结构重参数化，训练多分支、推理单路融合加速运算；三是 INT8 量化压缩模型存储空间；四是知识蒸馏，将大模型特征知识迁移至轻量化网络，弥补压缩带来的精度损失；五是难例挖掘，强化轻度侧弯难分样本的训练效果。

（五）协同模型整体工作流程

模型完整运行流程分为三步：影像预处理监测、多任务协同决策、检测结果输出执行。

第一步预处理监测：对输入脊柱 X 光片统一灰度、降噪、边缘增强；在训练阶段使用平移、旋转、缩放做数据增广，过滤异常影像干扰。

第二步协同决策：KANSpine 模块完成多尺度特征提取，双分支检测头依托特征同步完成关键点定位与 Cobb 角回归，依托复合损失函数迭代更新网络参数。

第三步结果执行输出：训练收敛后的轻量化模型接收原始影像，直接输出椎体关键点位置与 Cobb 角测量数值，自动完成脊柱侧弯分级筛查，辅助医师快速诊断。

四、数据集搭建与实验结果分析

（一）数据集构建与预处理

实验数据集取自公开脊柱 X 线影像库，样本覆盖正常脊柱、轻度侧弯 $5^\circ \sim 10^\circ$ 、中度侧弯 $10^\circ \sim 25^\circ$ 、重度侧弯 $> 25^\circ$ 、脊柱后凸等多种病症，覆盖多年龄段人群。全部影像经过隐私脱敏处理；统一图片尺寸、滤除图像噪声；采用随机几何变换扩充样本，提升模型泛化性能。

（二）实验环境与评价指标

实验基于 PyTorch 深度学习框架开展，选用指标：关键点指标 PCK@0.05、检测精度 mAP@0.5、Cobb 角测量误差、ICC 组内相关系数、模型体积、单图推理速度等。实验完成后程序可输

出终端日志、X 光椎体标注效果图、量化性能数据，用于多维度对比改进前后模型性能。

（三）对比实验结果

同原生 YOLOv10、传统 CNN 模型进行对照试验，分别从椎体标注可视化、Cobb 角测算结果、量化性能指标三个维度开展分析。

首先进行椎体目标检测可视化对比，如图2所示为 KAN 增强 YOLOv10 的椎体标注效果图，模型完整检出全部 10 节目标椎体，各椎体预测置信度分布在 0.60~0.81。椎体标注框沿脊柱纵向有序排布，无漏检、错框问题；如图3所示为未替换 KAN 的原生 YOLOv10（MLP 基线）检测结果，基线模型虽能检出 10 个椎体，但椎体序号排布错乱、标注框位置无序，对椎体边缘细微特征提取不足，定位规整度劣于 KAN 改进模型^[5]。

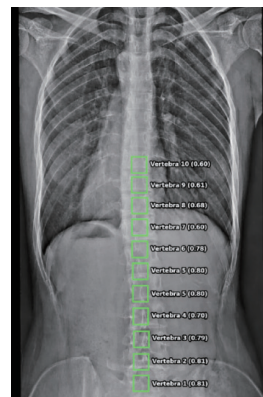


图2改进模型 X 光椎体检测效果图

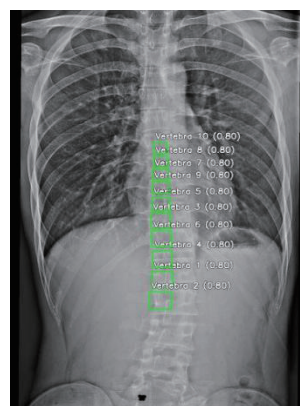


图3原始 YOLOv10 检测效果图

其次，依托程序终端输出日志分析 Cobb 角测算精度，如图4所示为两组模型推理日志对比。KAN 改进模型检出椎体数量为 10，测算 Cobb 角为 0.2° ；原生 MLP 基线模型同样检出 10 节椎体，Cobb 角测算值为 0.4° 。针对正常脊柱样本，改进模型角度测算误差更小，验证一体化双分支结构搭配角度敏感损失函数可以有效降低 Cobb 角回归误差。

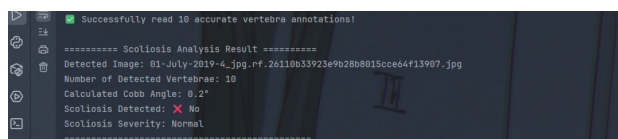




图 4改进组与基线组推理日志对比

最后，通过量化指标对比模型综合性能，如图 5 所示，将 C2F 模块内 MLP 替换为 KAN 后，模型参数量由 20.00M 上涨至 23.50M，增幅 17.5%；mAP@0.5 由 0.895 提升至 0.917，提升了特征提取能力。经全套轻量化改造后，模型可在普通 CPU 设备实时推理，满足基层体检筛查部署条件。

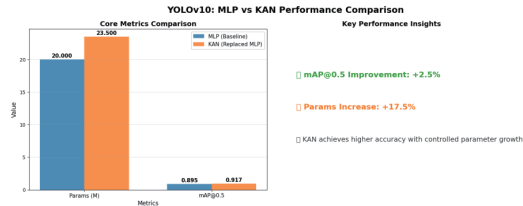


图 5 模型参数量与 mAP 指标对比柱状图

五、结论

本文从特征增强、多任务协同检测、网络轻量化三个维度搭建 KAN-YOLOv10 筛查模型：引入 KAN 网络显著提升椎体细微非线性特征提取能力，解决轻度侧弯漏诊问题；检测测角一体化架构消除分步计算误差，优化 Cobb 角自动测量精度；多层次轻量化策略实现模型 CPU 端低成本部署。

六、展望

后续研究可从四方面深化拓展：第一，扩充多中心、多设备来源数据集，提升模型在不同人群、不同影像设备下的泛化能力；第二，融合光学成像、深度相机技术，研发无辐射非接触式脊柱筛查算法；第三，引入联邦学习与边缘计算，在数据合规保密前提下实现跨机构协同迭代优化模型；第四，搭建筛查-诊疗-随访全链条闭环系统，完善脊柱健康智能化管理体系。

参考文献

[1]WangA, ChenH, LiuL, et al.YOLOv10: Real-TimeEnd-to-EndObjectDetection[J/OL].arXiv: 2405.14458, 2024.
[2]SapkotaR, KarkeeM. UltralyticsYOLOEvolution: AnOverviewofYOLO26, YOLO11, YOLOv8, andYOLOv5ObjectDetectorsforComputerVisionandPatternRecognition[EB/OL]. (2025-10-01).<https://arxiv.org/pdf/2510.09653v2>.
[3]RedmonJ, FarhadiA. YOLOv3: AnIncrementalImprovement[J/OL].arXiv: 1804.02767, 2018.
[4]BochkovskiyA, WangCY, LiaoHYM. YOLOv4: OptimalSpeedandAccuracyofObjectDetection[J/OL].arXiv: 2004.10934, 2020.
[5]LiuZ, WangY, VaidyaS, et al.KAN: Kolmogorov-ArnoldNetworks[J/OL].arXiv: 2404.19756, 2024.
[6]DrokinI. Kolmogorov-ArnoldConvolutions: DesignPrinciplesandEmpiricalStudies[EB/OL].(2024-07-02).<https://arxiv.org/pdf/2407.01092>.
[7]SomvanshiS, JavedSA, IslamMMand others.ASurveyonKolmogorov-ArnoldNetwork[EB/OL].(2024-11-08).<https://arxiv.org/pdf/2411.06078>.
[8]PANYL, CHENQR, CHENTTand others.Evaluationofacomputer-aidedmethodformeasuringtheCobbangleonchestX-rays[J].EuropeanSpineJournal, 2019, 28: 3035-3043.
[9]KONIECZNYMR, SENYURTH, KRAUSPER.Epidemiologyofadolescentidiopathic scoliosis[J].JournalofChildren'sOrthopaedics, 2013, 7(1): 3-9.
[10]BernsteinP, MetzlerJ, WeinzierlM, et al. Radio graphic Scoliosis AngleEstimation: Spline-BasedMeasurementRevealsSuperiorReliabilityComparedtoTraditionalCobbMethod[J].European Spine Journal, 2020, 29(12): 3033-3042.