

Cobb角负重位三维自动成像与X线平片的对比分析

李鑫源,张心之,狄德润,原所茂,刘新宇,王连雷

(山东大学齐鲁医院骨科,山东 济南 250012)

摘要:目的 评估新型负重位三维自动成像(weight-bearing 3D imaging, WR-3D)技术在应用于青少年特发性脊柱侧凸 Cobb角测量中,与传统站立位X线平片的一致性。方法 选取2025年7月至10月就诊于山东大学齐鲁医院骨科青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)患者52例,均同期接受站立位全脊柱X线及WR-3D扫描。采用Pearson相关分析评估两种方法得出结果的线性关联,并采用Bland-Altman分析计算平均偏差及95%CI,利用组内相关系数ICC评估信度。采用配对t检验评估系统性偏差,并计算Cohen's d值以评估效应量。结果 WR-3D与传统X线测量值呈显著正相关($r=0.977, P<0.001$)。Bland-Altman分析显示,平均偏差为 -1.37° (95%CI: $-7.32^\circ \sim 4.58^\circ$),绝大部分数据点(51/52)位于一致性界限内。组内相关系数(ICC=0.973, 95%CI: 0.954~0.985)显示极佳的一致性。配对t检验提示差异有统计学意义($P=0.002$),但效应量显示为中等程度(Cohen's $d=0.450$)。结论 WR-3D系统与传统X线平片在测量Cobb角时具有高度一致性,细微差别在临床实际中影响不显著,且因其三维、负重位及低辐射的特点而具有广阔临床应用前景。

关键词:青少年特发性脊柱侧凸;Cobb角;自动测量;三维成像;负重位成像;一致性

中图分类号:R682.3

文献标志码:A

Comparative analysis of Cobb angle in weight-bearing 3D automatic imaging and X-ray plain film

LI Xinyuan, ZHANG Xinzhi, DI Derun, YUAN Suomao, LIU Xinyu, WANG Lianlei

(Department of orthopedics, Qilu Hospital of Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China)

Abstract: Objective To evaluate the consistency of a new weight-bearing three-dimensional imaging (WR-3D) technology in measuring Cobb angles of adolescent idiopathic scoliosis (AIS) patients with traditional standing X-ray films.

Methods From July to October, 2025, a total of 52 AIS patients have been enrolled at Qilu Hospital of Shandong University and underwent both standing full-spine X-ray and weight-bearing three-dimensional imaging examinations simultaneously. Pearson correlation analysis was used to assess the linear association between the two methods. Bland-Altman analysis was performed to calculate the mean bias and 95% limits of agreement, and the intraclass correlation coefficient (ICC) was used to evaluate the reliability. Paired t-test was used to test for systematic bias, and Cohen's d was calculated to assess the effect size. **Results** There was a significant positive correlation between the measurements of WR-3D and traditional X-ray ($r=0.977, P<0.001$). Bland-Altman analysis showed a mean bias of -1.37° (95%CI: -7.32° to 4.58°), and the majority of data points (51/52) were within the limits of agreement. The ICC indicated excellent consistency (ICC=0.973, 95% CI: 0.954 to 0.985). Paired t-test suggested a statistically significant difference ($P=0.002$), but the effect size was moderate (Cohen's $d=0.450$). **Conclusion** The WR-3D imaging system has excellent consistency with traditional X-ray in measuring Cobb angles of AIS patients, and the minor systematic bias has

收稿日期:2025-10-21

基金项目:国家自然科学基金(U24A20670, 82172483, 82102522);国家重点研发计划(2023YFC2509700);山东省泰山学者项目(tsqn202211317, tstp20231247);山东省重点研发项目(2022CXGC010503, 2022ZLGX03);山东省自然科学基金(ZR202102210113);国家高水平医院临床研究基金(2022-PUMCH-D-004)

通信作者:刘新宇。E-mail: newyuliu@163.com

王连雷。E-mail: wllspine@163.com

no significant clinical significance. This technique, combined with its three-dimensional, weight-bearing, and low-radiation advantages, provides a reliable new clinical tool for the precise assessment of scoliosis.

Key words: Adolescent idiopathic scoliosis; Cobb angle; Automatic measurement; Three-dimensional imaging; Weight-bearing imaging; Consistency

青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)是一种病因尚不明确、以三维空间上排布发生改变为特征的复杂脊柱畸形^[1],发病率为1%~4%^[2-3],是我国青少年面临的公共卫生问题之一。鉴于其进展过程中可能带来的呼吸系统和神经系统影响,尽早的诊断和干预尤为重要^[4]。

传统的诊断体系主要将二维X线平片成像影像作为金标准,测量Cobb角 $\geq 10^\circ$ 即诊断脊柱侧弯^[5]。作为一种畸形疾病,AIS的三维属性不可忽视^[6]。然而X线作为一种二维成像的拍摄技术,在刻画脊柱侧凸的三维层面联合畸形时难免有疏漏,易受到组织或外衣遮盖、X线投射角度变化和摆位不同、不同医生测量习惯各异的影响^[7]。

近年的测量技术发展开始向以X线扫描为核心的负重位和自动化方向拓展^[8]。本研究聚焦于负重位三维自动成像系统(weight-bearing 3D imaging, WR-3D),旨在通过与临床金标准——站立位X线片进行严谨地方法学比较,系统评估该技术在测量AIS患者Cobb角方面的临床适用性,验证其能否提供与X线相当的高精度测量结果。该技术独有的三维、负重、低辐射特性,结合内嵌的自动测量算法,将为实现AIS的精准、高效、安全评估开辟一条全新的路径,为该创新技术在临床的推广与应用提供关键的循证医学证据。

1 资料与方法

1.1 临床资料

1.1.1 研究对象

回顾性分析2025年7月至10月于山东大学齐鲁医院骨科就诊的AIS患者52例,其中男13例,女39例,10~18岁,平均14.1岁。本研究已获得山东大学齐鲁医院医学伦理委员会批准[KYLL-2021(KS)-055]。所有研究对象均签署书面知情同意书。

1.1.2 纳入标准与排除标准

纳入标准:①受试者均由我院脊柱专科医师确诊为AIS患者;②在WR-3D检查前3周内接受过脊柱正位X线检查,以确保两者测量结果的可比性。

排除标准:①站立平衡能力不足,无法配合完成WR-3D扫描;②脊柱内已植入内固定装置;③在2D

与3D检查间隔期间接受过脊柱手术治疗;④因过度运动导致WR-3D图像质量不佳,无法进行三维重建。

1.2 方法

1.2.1 X线平片

在进行二维Cobb角测量时,由两位经验丰富的脊柱外科医师共同识别并商定脊柱X线平片上弯曲曲线中倾斜角度最大的上下终椎椎体。随后分别沿上下终椎绘制直线,测量两直线垂线间的夹角,即为Cobb角。对于双弯曲(Cobb角均 $> 10^\circ$)患者,同时测量主弯和次弯的Cobb角。

1.2.2 WR-3D

1.2.2.1 系统构成

WR-3D系统(深圳安健技术股份有限公司)核心组件包括X射线管、平板探测器和电动旋转站立平台(图1)。其中,电动站立平台位于X射线管与平板探测器之间,可带动受检者匀速旋转以采集多角度透视图像;X射线管与平板探测器可沿垂直方向移动,实现脊柱的分段扫描,进而扩大纵向视野。

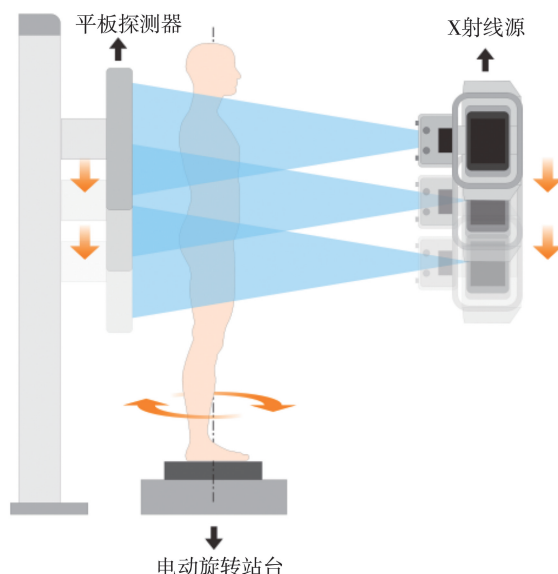


图1 WR-3D系统示意图

Figure 1 Diagram of the weight-bearing 3D system

1.2.2.2 扫描及图像分割原理

使用110 kV管电压、6 mA管电流,源像距为150 cm;单段扫描纵向覆盖范围为30 cm,总曝光时间为75 s(每段25 s),检查总时间(含X射线管与探

测器垂直移动时间)为 90 s, 计量指数体积为 1.23 mGy; 纵向视野(Z 轴)最大可达 90 cm。受检者站立于电动平台。扫描范围设定为从 C6 椎体至 S1 椎体, 根据受检者身高分段进行扫描。使用经典的 Feldkcunp-Davis-Kress(FDK)重建算法^[9]分别对各段图像进行图像重建。对相邻段的三维断层, 根据相同水平位置的断层图之间的相关系数进行偏移参数估计并完成图像拼接和融合^[8]。

采用 3D-UNet 深度学习模型(如图 2)对 WR-3D 图像中的椎体和股骨头进行自动分割, 模型结构包含编码器(含残差块和下采样卷积层)和解码器(含上采样卷积层和拼接层)。该模型属于一种转为医学图像设计的卷积神经网络, 采用 Dice 损失进行残差计算以完成分割任务, 该模型已经过开发和改进, 对大量样本进行了充分学习, 结果良好^[10]。

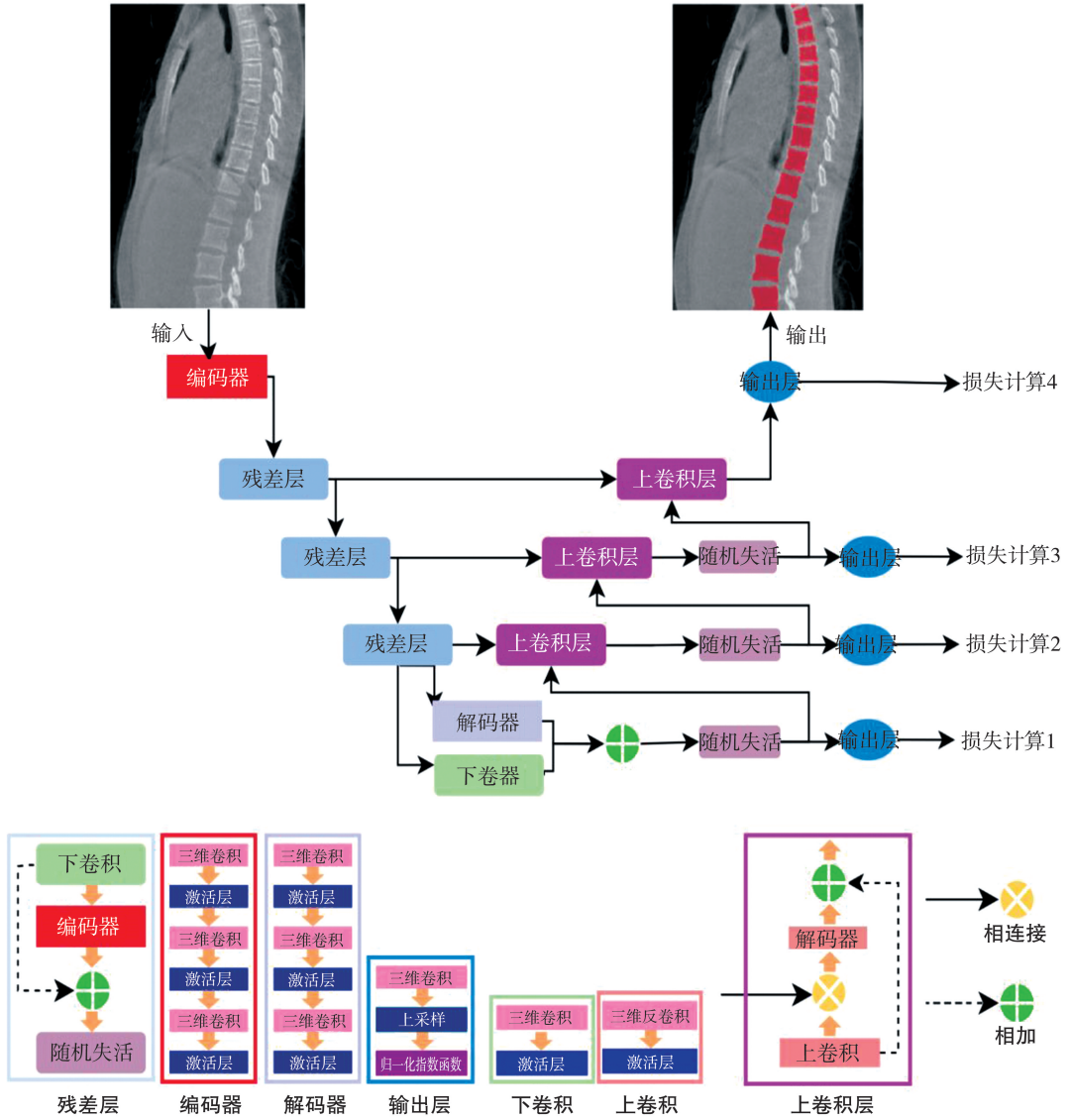


图 2 3D-UNet 网络框架图
Figure 2 3D-UNet network framework diagram

1.2.2.3 三维 Cobb 角测量

自动测量方法: 基于分割后的掩码图像, 转化为三维表面模型, 首先为上端椎的上终板和下端椎的下终板分别拟合最佳平面。然后, 将两最佳平面与全局冠状面(由股骨头连线和 Z 轴定义)相交, 得到两条交线。最后, 测量两条交线间的夹角, 即为 3D Cobb 角^[10]。这两条交线都在全局冠

状面内, 规避了患者摆位不正对测量结果产生影响的问题。如图 3 所示, 自动测量报告会提供识别出的顶椎和上、下端椎, 以及测量得出的 Cobb 角数据。本操作由两位脊柱外科医师和两位影像科医师在未知晓 X 线测量结果前提下独立完成, 计算角度平均值用于分析。

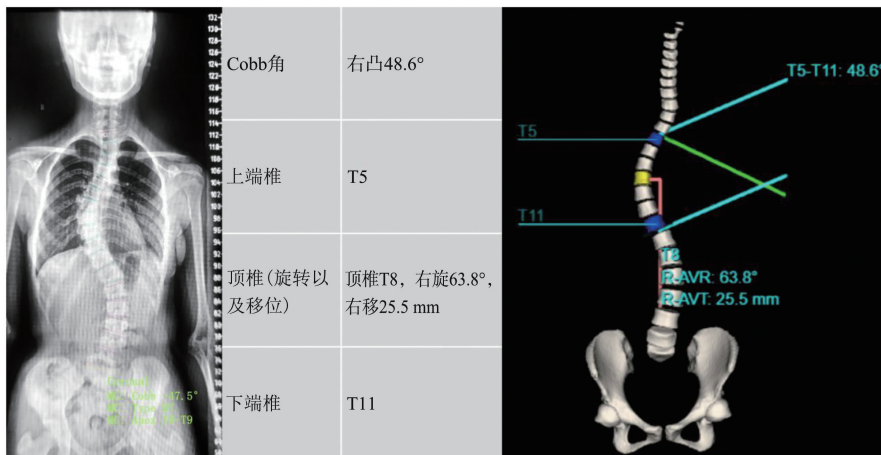


图3 同一受试者的脊柱X线正位片和WR-3D全脊柱自动测量电子报告的Cobb角部分

Figure 3 X-ray and Cobb angle data of the WR-3D full spine measurement report from the same patient

1.3 统计学处理

采用SPSS 25.0统计学软件。采用Pearson相关系数计算评估WR-3D与传统X线测量值之间的总体关联强度。所得数据采用配对 t 检验。采用Bland-Altman分析法评估X线测量与WR-3D重建测量Cobb角两种途径的一致性,计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示。随后计算两方法测量差值的均值(平均偏差)和标准差以及95%一致性界限,95%一致性界限定义为平均偏差 $1.96 \times$ 差值的标准差。同时,采用双向随机效应模型和绝对一致性的组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评估两种测量方法的信度。ICC >0.9 认为一致性极佳,0.75~0.9认为一致性良好^[11]。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 患者测量数据描述

传统站立位全脊柱X线正侧位摄片结果分布在 $12.3^\circ \sim 66.1^\circ$,平均 35.5° ;WR-3D为 $14.0^\circ \sim 66.6^\circ$,平均 36.8° 。

2.2 两种测量方法的相关性与一致性评估

采用Pearson相关系数计算评估WR-3D与传统X线测量值之间的总体关联强度。结果显示,两种方法测得的Cobb角数值呈正相关($r=0.977, P<0.001$)。

2.2.1 Bland-Altman分析

如表1所示,WR-3D所测Cobb角略高于传统X线测量值,其平均偏差为 -1.37° ,该偏差的95%一致性界限为 $-7.32^\circ \sim 4.58^\circ$ 。由此表明,两种方法相关性极高,但相关并不等同于良好的一致。

表1 Bland-Altman描述统计

Table 1 Bland-Altman descriptive statistics

项目	数值
有效样本量	52
均值(传统X线)	35.458
均值(WR-3D)	36.825
均值(差值)	-1.367
标准差(差值)	3.036
95%CI(差值均值)	-2.213~-0.522
95%CI(差值)	-7.318~4.583
$t(H_0: \text{差值的平均值}=0)$	-3.248
$P(H_0: \text{差值的平均值}=0)$	0.002
CR	6.474

如图4显示,平均偏差线($Y=-1.367$)清晰地处于零偏差线($Y=0$)下方,表明WR-3D得数略高于常规X线。另外,可见绝大多数的数据点(52个点中的51个)均位于95%一致性界限范围之内,一点超出横线代表的置信区间。差值的标准差为 3.03° ,表明测量差异存在一定的离散程度。

2.2.2 组内相关系数分析

在双向随机效应模型、绝对一致性的设定下,得出单一度量ICC为0.973(95%CI:0.954~0.985)。根据通行的评价标准(ICC >0.9 表示一致性极佳),WR-3D与传统X线在单次Cobb角测量中具有很高的信度和一致性。

2.3 两种测量方法的系统性偏差检验

WR-3D与传统X线的测量值之间存在明确的系统性偏差($t=-3.248, P=0.002$)。且得出两种方法差值均值的95%CI($-2.213^\circ \sim -0.522^\circ$),区间不包含0,表明该系统偏差存在的可靠性。

最后计算效应量Cohen's d 值以量化此偏差的实际幅度,测量结果是0.450。根据Cohen的准则

(0.2、0.5、0.8 分别代表小、中、大效应),该偏差幅度属于中等效应。统计检验结果虽然显著,但该平均

偏差在实际应用中仍需要结合临床度量(常规允许误差范围 5° 之内)。

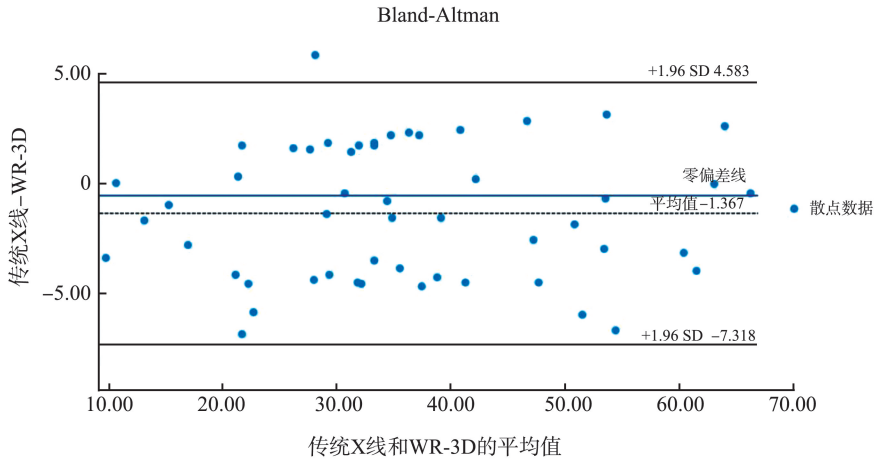


图4 传统X线与WR-3D测量Cobb角的相关性

Figure4 Scatter plot showing the correlation of Cobb angle measurements between conventional X-ray and WR-3D

3 讨论

传统X线受限其于二维特性,无法精准评估椎体旋转参数,而椎体旋转是脊柱侧弯三维畸形的重要组成部分,并与疾病的进展密切相关^[12];CT扫描能提供精细解剖细节,但仍受患者体位等因素制约,纵使衍生椎束CT技术,也难逃高辐射风险^[13-14];超声筛查便捷的同时,对严重畸形及术后患者检查准确性下降^[15];MRI影像价值高,却成本昂贵^[16-17],都难以替代X光在复杂病例和术前规划中的主导作用及其金标准地位。

此外,影像技术与智能算法相结合,构建闭环的诊疗评估系统,也是未来一大趋势。AIS的影像评估正从“主观经验判断”迈向“客观数据驱动”的新阶段。X线应用卷积神经网络构建的深度学习模型表现十分出色,但仍受X线本身特点桎梏难以突破;基于体貌特征设计的智能诊断模型与三维超声、CT重建中人工智能的应用非常巧妙,却难逃受外界影响大、产生数据略小于金标准等缺点^[18-19],也有国内外学者表达此类技术在面对金属植入物时判断出错的担忧^[20-21]。

鉴于此,能够集负重体位、低辐射、三维成像与智能分析于一体的技术,将成为破局的关键。WR-3D不仅有效弥补了上述主流影像学 with 智能评估方法的不足,更以其“成像-分析”一体化设计,成为融合先进成像与人工智能的典范。WR-3D可以提供椎体旋转度、矢状面平衡等其他参数。此外,其低剂量的特性(剂量约为传统CT的10%~20%)对

于需要定期随访以监测病情进展的青少年患者而言,显著降低累积辐射暴露带来的风险^[22]。结合其自动测量算法,WR-3D技术有望构建一个从精准成像到智能诊断的高效诊断评估工作闭环,自动识别、分割锥体,并实现与各种诊断方式的结合,为脊柱侧弯的诊疗效率与标准化赋能^[23-24]。

本研究通过一系列统计学方法评估WR-3D在脊柱侧弯Cobb角测量中相较于传统X线金标准的准确性与一致性。结果显示,WR-3D与传统X线对于Cobb角测量值之间差异有统计学意义,但其他统计方法的指标和临床工作共同证实两者具备较高的一致性,统计显著性与临床实用性的统一是本研究现阶段的主张和继续深化验证的方向。其中,两方法测得Cobb角数据有 -1.37° 的系统偏差($P=0.002$),其原因可能在于WR-3D新技术本身的影像学选择和计算原则。然而,统计学中的显著性不同于临床应用上的差异性,这一偏差的存在于临床影响较小^[25]。随后的Bland-Altman分析更具综合价值(Cohen's d 值为0.450,属中等效应),且 5° 以内的差异通常可以在临床实践中被接受,并不认定与病情进展有关^[26]。然而,两种方法在个体层面的一致性界限较宽,对于处于决策阈值附近的病例,则需综合临床实际进行考量。最后,Pearson相关系数($r=0.977$)与组内相关系数($ICC=0.973$)为研究提供强力支撑,尤其是后者从测量信度的方面印证单次WR-3D测量结果与单次X线测量结果具有高度的可靠性和可互换性^[27-28],为WR-3D技术使用在单个患者诊断中的可靠性提供了坚实支撑。

WR-3D技术带来的新视野不仅限于其测量的

一致性,其核心优势在于能够提供“三维、负重、低辐射”三位一体的测量。传统 X 线难以准确评估椎体旋转等三维参数,而 WR-3D 可弥补这一不足,为全面理解脊柱三维畸形及其进展提供新视角。因此,该技术并非旨在完全替代 X 线,而是与之形成互补,两者的有机结合将助力脊柱侧凸诊疗体系智能化、精细化和动态化,实现从微观雕琢三维细节的同时,宏观上助力疾病诊治、随访和健康管理。

除此之外,WR-3D 技术还可以提供骨盆参数和下肢力线参数,进行全身姿势评估,描绘出“脊柱-骨盆-下肢”链的空间关系和力学特征,为诊治提供更加全面与综合的视角。为进一步提升该技术的临床应用潜力,未来将在以下方面进行改良:优化成像算法以提高信噪比与分辨率;给出侧凸分型并结合三维数据改进分型,降低设备成本以促进普及和助力筛查工作;探索其在长期随访中的标准化方案。

本研究尚存在一定局限性。本研究主要聚焦于 Cobb 角的一致性,未来研究可进一步利用 WR-3D 的三维数据,深入分析其在评估椎体旋转、矢状面参数等方面的独特价值。本研究为单中心研究,样本量相对有限,未来需要更大规模、多中心地研究来进一步验证和巩固本研究的结论。

综上所述,WR-3D 技术能为脊柱侧弯患者提供良好术前评估以为临床工作提速赋能。结合其三维、负重、低辐射的突出优势以及自动测量带来的高效性,WR-3D 技术不仅能作为一种值得信赖的替代工具用于测量和诊断,更有望推动脊柱侧弯诊疗迈向多维化、精细化和自动化,其临床应用前景广阔深远。

参考文献:

- [1] Peng Y, Wang SR, Qiu GX, et al. Research progress on the etiology and pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Chin Med J*, 2020, 133(4): 483-493.
- [2] Weinstein SL, Dolan LA, Cheng JC, et al. Adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Lancet*, 2008, 371(9623): 1527-1537.
- [3] 张献伟,孙志颖,刘忠慧,等.天津市中学生脊柱侧弯流行特征及影响因素分析[J]. *中国学校卫生*, 2023, 44(1): 115-118.
ZHANG Xianwei, SUN Zhiying, LIU Zhonghui, et al. Epidemiological characteristics and influencing factors of scoliosis among middle school students in Tianjin[J]. *Chinese Journal of School Health*, 2023, 44(1): 115-118.
- [4] Zloof Y, Ankory R, Braun AE, et al. The hereditary nature of adolescent spinal deformities: a study of over 600,000 adolescents[J]. *Spine*, 2022, 47(12): 841-846.
- [5] Horne JP, Flannery R, Usman S. Adolescent idiopathic scoliosis: diagnosis and management[J]. *Am Fam Physician*, 2014, 89(3): 193-198.
- [6] 李超,孙小刚,李昊,等.机器人联合三维“C”型臂辅助置钉在 44 例脊柱侧弯矫形术中的应用价值[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2023, 61(3): 107-114.
LI Chao, SUN Xiaogang, LI Hao, et al. Application value of robot combined with three-dimensional “C”-arm assisted screw placement in 44 cases of scoliosis correction surgery[J]. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 2023, 61(3): 107-114.
- [7] Vrtovec T, Pernus F, Likar B. A review of methods for quantitative evaluation of spinal curvature[J]. *Eur Spine J*, 2009, 18(5): 593-607.
- [8] Liang ZJ, Xia CC, Wang Q, et al. Weight-bearing cone-beam CT with extensive coverage for volumetric imaging in adolescent idiopathic scoliosis: system implementation and initial validation[J]. *Phys Eng Sci Med*, 2023, 46(4): 1467-1474.
- [9] Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam algorithm[J]. *J Opt Soc Am A*, 1984, 1(6): 612-619.
- [10] Liang ZJ, Wang Q, Xia CC, et al. From 2D to 3D: automatic measurement of the Cobb angle in adolescent idiopathic scoliosis with the weight-bearing 3D imaging[J]. *Spine J*, 2024, 24(7): 1282-1292.
- [11] Fleiss JL, Cohen J. The equivalence of weighted kappa and the intraclass correlation coefficient as measures of reliability[J]. *Educ Psychol Meas*, 1973, 33(3): 613-619.
- [12] 王谦,李梦,柳学明,等.三维超声成像技术测量青少年特发性脊柱侧凸患者顶椎旋转角度的信度与效度分析[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2018, 49(3): 436-441.
WANG Qian, LI Meng, LIU Xueming, et al. Reliability and validity of three-dimensional ultrasound imaging in measuring vertebral rotation angle in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Journal of Sichuan University (Medical Sciences)*, 2018, 49(3): 436-441.
- [13] 贾慧展,李晓,雷琳,等.锥形束 CT 图像引导下对乳腺癌放疗不同体位固定方式的摆位误差分析[J]. *重庆医学*, 2024, 53(11): 1626-1629.
JIA Huizhan, LI Xiao, LEI Lin, et al. Analysis of setting error of different posture fixation methods for breast cancer radiotherapy under the guidance of cone-beam CT images[J]. *Chongqing Medicine*, 2024, 53(11): 1626-1629.
- [14] Oenning AC, Salmon B, de Faria Vasconcelos K, et al. DIMITRA paediatric skull phantoms: development of age-specific paediatric models for dentomaxillofacial

- radiology research [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2018, 47(3): 20170285. doi:10.1259/dmfr.20170285
- [15] Yang XY, Di DR, Lv YH, et al. Three-dimensional ultrasonography: advancing the clinical evaluation of adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Ultrason Sonochem*, 2025, 119: 107391. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107391
- [16] 吴南, 仇建国, 朱源棚, 等. 人工智能在脊柱畸形诊疗中的应用 [J]. *山东大学学报(医学版)*, 2023, 61(3): 14-20.
WU Nan, ZHANG Jianguo, ZHU Yuanpeng, et al. Application of artificial intelligence in diagnosis and treatment of spinal deformity [J]. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 2023, 61(3): 14-20.
- [17] 管昱杰, 赵彬. 人工智能在脊柱侧弯筛查和诊断中的应用与展望 [J]. *中国组织工程研究*, 2026, 30(3): 721-730.
GUAN Yujie, ZHAO Bin. Application and prospect of artificial intelligence in screening and diagnosis of scoliosis [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2026, 30(3): 721-730.
- [18] Wong J, Reformat M, Parent E, et al. Convolutional neural network to segment laminae on 3D ultrasound spinal images to assist Cobb angle measurement [J]. *Ann Biomed Eng*, 2022, 50(4): 401-412.
- [19] Jiang WW, Yu CH, Chen XT, et al. Ultrasound to X-ray synthesis generative attentional network (UXGAN) for adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Ultrasonics*, 2022, 126: 106819. doi: 10.1016/j.ultras.2022.106819
- [20] 谢坤杰, 严亚波, 林锦聪, 等. 人工智能在儿童脊柱侧弯诊断中的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2025, 33(5): 459-463.
XIE Kunjie, YAN Yabo, LIN Jincong, et al. Research progress of artificial intelligence in the diagnosis of scoliosis in children [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2025, 33(5): 459-463.
- [21] Xu H, Cui XX, Li CF, et al. RUnT: a network combining residual U-Net and transformer for vertebral edge feature fusion constrained spine CT image segmentation [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 55692-55705. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3281468
- [22] 施江媛, 宋莹, 李光俊, 等. 基于深度学习的低剂量锥形束计算机断层扫描图像重建方法研究进展 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2025, 42(3): 635-642.
SHI Jiangyuan, SONG Ying, LI Guangjun, et al. Research progress of low-dose cone-beam computed tomography image reconstruction method based on deep learning [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2025, 42(3): 635-642.
- [23] Zhang BL, Chen KH, Yuan HD, et al. Automatic Lenke classification of adolescent idiopathic scoliosis with deep learning [J]. *JOR Spine*, 2024, 7(2): e1327. doi: 10.1002/jsp2.1327
- [24] Sáenz-Gamboa JJ, Domenech J, Alonso-Manjarrés A, et al. Automatic semantic segmentation of the lumbar spine: clinical applicability in a multi-parametric and multi-center study on magnetic resonance images [J]. *Artif Intell Med*, 2023, 140: 102559. doi: 10.1016/j.artmed.2023.102559
- [25] Grayson W, Chakraborty A, Brown NM. Fully randomized predictor-outcome pairings using a national database yield frequent statistical significance without clinical meaning [J]. *J Arthroplasty*, 2025; S0883-S5403(25). doi: 10.1016/j.arth.2025.08.053
- [26] Dagi MM, Sussman JH, Gujral J, et al. Development and validation of a keypoint region-based convolutional neural network to automate thoracic Cobb angle measurements using whole-spine standing radiographs [J]. *Acta Neurochir*, 2025, 167(1): 227. doi: 10.1007/s00701-025-06645-x
- [27] Zaki R, Bulgiba A, Nordin N, et al. A systematic review of statistical methods used to test for reliability of medical instruments measuring continuous variables [J]. *Iran J Basic Med Sci*, 2013, 16(6): 803-807.
- [28] Mitchinson S, Johnson JH, Milner B, et al. Capturing expert uncertainty: ICC-informed soft labelling for volcano-seismicity [J]. *Bull Volcanol*, 2025, 87(10): 84. doi: 10.1007/s00445-025-01875-4

(编辑:徐苗蓁)