

青少年特发性脊柱侧凸有限元模型建立与活动度分析

孙 昂¹, 程云章¹, 彭 飞^{2*}

¹上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

²海军军医大学第二附属医院(上海长征医院), 护理部, 上海

收稿日期: 2024年12月17日; 录用日期: 2025年1月10日; 发布日期: 2025年1月17日

摘 要

研究背景: 脊柱侧凸是一种人体脊柱在空间上产生弯曲变形的疾病, 有的侧凸还伴随着椎体旋转, 且严重时会同多种并发症。青少年特发性脊柱侧凸(AIS)即发生在青少年身上。作为一种高级的数学近似方法, 有限元分析方法(FEA)已在生物力学领域研究中取得广泛应用。目前, 导致脊柱侧凸发生的具体病因目前尚未明确。目的: 本研究旨在建立一例脊柱侧凸模型, 利用有限元技术得出其各个节段的活动度, 将其与以往研究中正常脊柱的活动度对比。方法: 获取一例AIS患者的CT数据, 利用Mimics, Solidworks等软件对模型进行三维重建, 利用Ansys软件得到其相应的活动度数值。结果: T1-T12节段椎体(正常无侧凸)的活动度与正常脊柱的高度相似, L1-L5节段椎体(侧凸部分)的活动度与正常脊柱的存在差异。结论: 脊柱侧凸会对关节活动度造成影响。

关键词

脊柱侧凸, 有限元, 生物力学, 活动度

Establishment of Finite Element Model and Range of Motion for Adolescent Idiopathic Scoliosis

Ang Sun¹, Yunzhang Cheng¹, Fei Peng^{2*}

¹School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Nursing Department of the Second Affiliated Hospital of Naval Medical University (Shanghai Changzheng Hospital), Shanghai

Received: Dec. 17th, 2024; accepted: Jan. 10th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 孙昂, 程云章, 彭飞. 青少年特发性脊柱侧凸有限元模型建立与活动度分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 671-679. DOI: 10.12677/mos.2025.141063

Abstract

Research Background: Scoliosis is a disease in which the human spine bends and deforms in space, and some scoliosis is accompanied by vertebral rotation, and in severe cases, it can be accompanied by various complications. Adolescent idiopathic scoliosis (AIS) occurs in adolescents. As an advanced mathematical approximation method, finite element analysis (FEA) has been widely used in the field of biomechanics research. At present, the specific causes of scoliosis are not yet clear. **Objective:** This study aims to establish a scoliosis model and use finite element technology to obtain the range of motion of each segment, and compare it with the range of motion of normal spine in previous studies. **Method:** Obtain CT data of an AIS patient, use Mimics, Solidworks and other software to perform 3D reconstruction of the model, and use Ansys software to obtain its corresponding activity values. **Result:** The range of motion of the T1-T12 vertebral bodies (normal without scoliosis) is similar to the height of the normal spine, while the range of motion of the L1-L5 vertebral bodies (scoliosis) is different from that of the normal spine. **Conclusion:** Scoliosis can affect joint mobility.

Keywords

Scoliosis, Finite Element, Biomechanics, Vertebral Rotation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

1.1. 脊柱侧凸概述

脊柱侧凸指人体的脊柱某一部分或全部分向一侧扭曲。按照不同的发病原因进行区分, 其可分为先天性(脊柱侧凸)、特发性、肌肉神经性等, 其中特发性的占比高达 75%~85%。同比其他年龄段的人群, 青少年患有脊柱侧凸(AIS)的几率更高, 其流行率在 1%~4% [1]。

AIS 严重到一定程度, 不仅会影响患者的外貌体型, 甚至可能引起许多其他症状, 如腰背部疼痛、心肺功能障碍, 影响胸廓运动甚至影响到脊髓造成下肢瘫痪[2]。

在脊柱侧凸患者中, 有相当部分患者其脊柱椎体会产生旋转。Patel [2]等提出, 椎体旋转会影响周围的软组织解剖结构。水平面内的椎体旋转是导致脊柱产生畸形的因素之一, 在脊柱畸形进展过程中会导致冠状畸形和呼吸功能障碍。如果患者的椎体旋转矫正不充分, 则会直接影响矫正治疗的满意度[3]。

1.2. AIS 的病因、诊断及治疗

截至目前, 国内外学者对其病因、发病机制、解剖和病理等进行了大量的研究和实验, 然而最后都没有得到明确的结论。国内外学者一直认为 AIS 的发病原因复杂, 是由多种原因共同产生的(例如遗传因素、激素水平等), 无法从根源上防止脊柱侧弯的产生。

一般而言, AIS 一般最常用的检查方式是 X 线检查。通过 X 片可以看出侧凸的一些相关因素, 如弯度, 旋转, 骨龄, 柔韧性等。评价侧凸是否严重的相关参数指标, 是 Cobb 角。通常认为, 当患者的 Cobb 角超过 10°, 那么该患者就会被确诊为患有脊柱侧弯疾病。医生通过脊柱 X 光片进行人工测量, 获取脊

柱侧弯的 Cobb 角，再根据 Cobb 角度的不同，对脊柱侧弯进行诊断[4]。

根据患者不同的 Cobb 角度大小、自然病史等因素，可将脊柱侧弯的治疗方式分为两类：手术方式和非手术方式。假如侧凸病人的 Cobb 角度超过 45° ，要对其进行手术治疗。如果患者的 Cobb 角在 20° 以内，可以先不进行治疗，而应该先进行严格的观察。如果每年其 Cobb 角度都增加 5° 及以上，就应该立即对其进行治疗。若患者的 Cobb 角介于 25° 至 45° ，适宜对其采用矫形器治疗的方式。

1.3. 有限元法

1.3.1. 有限元法概述

最早提出有限元分析是在上世纪 50 年代，刚开始主要是被应用于解决飞行器结构的计算，随后被广泛应用在工程领域。而随着计算机技术的进步以及生物力学的发展，有限元分析被广泛应用在了医学领域[5]。

1.3.2. 有限元法在医学中的应用

1972 年，Brekelmans 等[6]首次尝试在医学领域运用有限元手段，利用该技术探究骨骼的应力情况。2019 年，赵俊勇等[7]建立了骨质疏松病人的三维胸椎段模型，使用有限元分析软件验证了使用椎弓根钉穿透椎体前部皮质骨能够提高内固定方式的稳定性。2021 年，李硕等[8]选取 1 例股骨髁上截骨患者，建立手术前后的膝关节三维有限元模型，对手术前后模型进行有限元分析，探究股骨髁上截骨矫治膝内翻的治疗效果。结果表明，股骨髁上截骨能够很好的矫正矫治膝内翻。

1986 年，Viviani 等[9]首次尝试将有限元技术运用到脊柱侧凸领域。2004 年，Périé 等[10]借助有限元法成功创建了 3 例有限元模型，同时在该模型中再次构建了骨盆、腹壁、胸壁、支具等模型，并且对 Boston 支具在模型施加的压力进行严密监测。2009 年，唐明星[11]借助建立的 Lenke1A 型模型，于 Cobb 角较小的情况下，对比分析了横向矫正、纵向拉伸及旋转三种不同力学干预手段的效果。结果表明就侧凸矫形效果而言，相比于纵向撑开力，横向矫正力治疗效果更优。2014 年，易红蕾[12]将一种新型矫形支具作用于已建立完成的脊柱侧凸模型上，观察其治疗效果，同时将其在临床上进行应用，观察其即刻矫正效应。结果证实该新型支具的疗效超过了以往所使用的传统支具。2019 年，辛大奇[13]对建立好的 Lenke3 型侧凸模型的各个区域施加矫正应力。其研究成果不仅为预测此类脊柱侧凸手术疗效提供了科学支撑，也为个性化手术方案的设计奠定了坚实的理论基础。

综合以上考量，本文研究内容如下：

1) 基于一例 AIS 患者的全脊柱 CT 影像数据，建立一个三维模型。

2) 对构建出的模型施加相应的力矩，利用有限元软件得出其各个节段的活动度，并与以往文献的实验结果做对比。

2. AIS 三维模型的构建

2.1. 材料

2.1.1. 获取影像数据

数据来自上海交通大学附属新华医院脊柱中心。患者基本信息：女性，15 岁，体重 47 kg，腰主弯，Cobb 角 20° 。

2.1.2. 设备及软件

64 层螺旋 CT 机螺旋 CT 扫描仪(美国 GE 公司)；医学影像软件 Mimics 21.0 (Materialise 公司，比利时)、逆向工程软件 Geomagic Wrap 2020 (Raindrop Geomagic 公司，美国)、Solidworks 2021 (达索系统，法国)。

2.2. 方法

2.2.1. 提取影像数据并建立三维模型

通过 CT (计算机断层扫描)技术获取人体脊柱影像常被作为获取侧凸影像数据最主要的方式[14]。将原始 CT 数据(DICOM 格式)导入到 Mimics 软件中,通过新建蒙版、区域增长等功能,得到初始的三维模型。将初始模型导入到 Geomagic Wrap 软件中,进行平滑处理,随后再将导出的新模型导入 Solidworks 软件中补充椎间盘,软骨等结构。

2.2.2. 材料赋值、划分网格、添加韧带

材料赋值:本研究模型中划分了皮质骨、松质骨、纤维环等结构,不同结构具备不同的弹性模量与泊松比。两者都表示材料弹性性质的物理量。本研究中的材料赋值如表 1 所示。

Table 1. Material properties of different parts of the three-dimensional spinal model of AIS patients

表 1. AIS 患者三维脊柱模型不同部位的材料属性

属性	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	12000	0.3
松质骨	100	0.2
软骨	10	0.4
髓核	1	0.499
纤维环	4.2	0.45

划分网格:由于脊柱模型的复杂性,本次模型统一采用四面体网格进行划分。软骨的网格大小设置为 0.5 mm,其余结构网格大小设置为 2.0 mm。

添加韧带:韧带具备稳定脊柱结构的功能。本研究中以弹簧的方式代替韧带。所添加的韧带的刚度值如表 2 所示。

Table 2. Corresponding stiffness values of different ligaments

表 2. 不同韧带的对应刚度值

韧带	刚度值(N/mm)
前纵韧带	8.74
后纵韧带	5.83
横突间韧带	15.38
黄韧带	0.19
棘上韧带	15.75
棘间韧带	2.39

至此,模型已建立完毕。模型如图 1 所示。

3. 获取活动度

软件: ANSYS 19.3 (ANSYS 公司, 美国)。

将脊柱模型中的 T1-T4, T5-T8, T9-T12, L1-L5 分别提取,包含其椎间盘及韧带。向每个节段的下表面施加约束固定(Fixed Support),在上表面施加不同方向,大小为 4000 N*mm 的力矩(Moment),模拟前屈,后伸,左侧屈,右侧屈,左旋转,右旋转,得到相应的活动度。与 Busscher 等[15]的研究结果做对比。

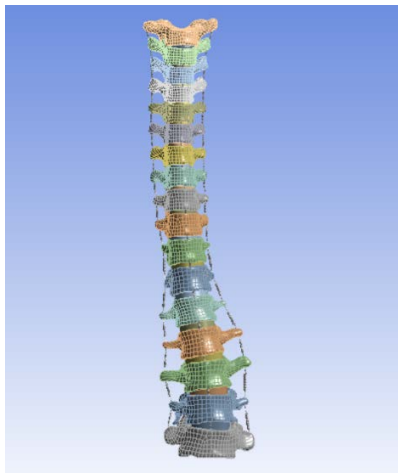


Figure 1. 3D model of the spine
图 1. 脊柱三维模型

4. 结果

4.1. T1-T4

T1-T4 在施加 4000 N*mm 力矩后，模拟前屈，后伸，左侧屈，右侧屈，左旋转，右旋转的活动度如表 3 所示。

Table 3. Range of motion in T1-T4 segments
表 3. T1-T4 的活动度

工况	屈伸	侧屈	旋转
活动度(°)	5.3	7.0	6.2

将所得数据与 Busscher 等人[15]的结果相比较，结果如图 2 所示。

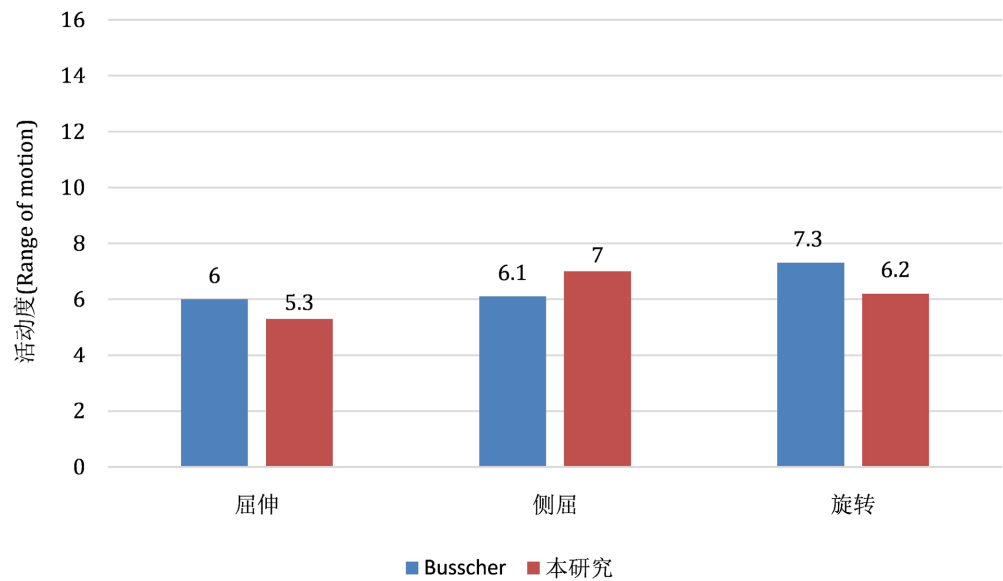


Figure 2. Comparison of the range of motion in T1-T4 segments
图 2. T1-T4 节段活动度对比

4.2. T5-T8

T5-T8 在施加 4000 N*mm 力矩后，模拟前屈，后伸，左侧屈，右侧屈，左旋转，右旋转的活动度如表 4 所示。

Table 4. Range of motion in T5-T8 segments
表 4. T5-T8 的活动度

工况	屈伸	侧屈	旋转
活动度(°)	2.3	6.5	5.0

将所得数据与 Busscher 等人[15]的结果相比较，结果如图 3 所示。

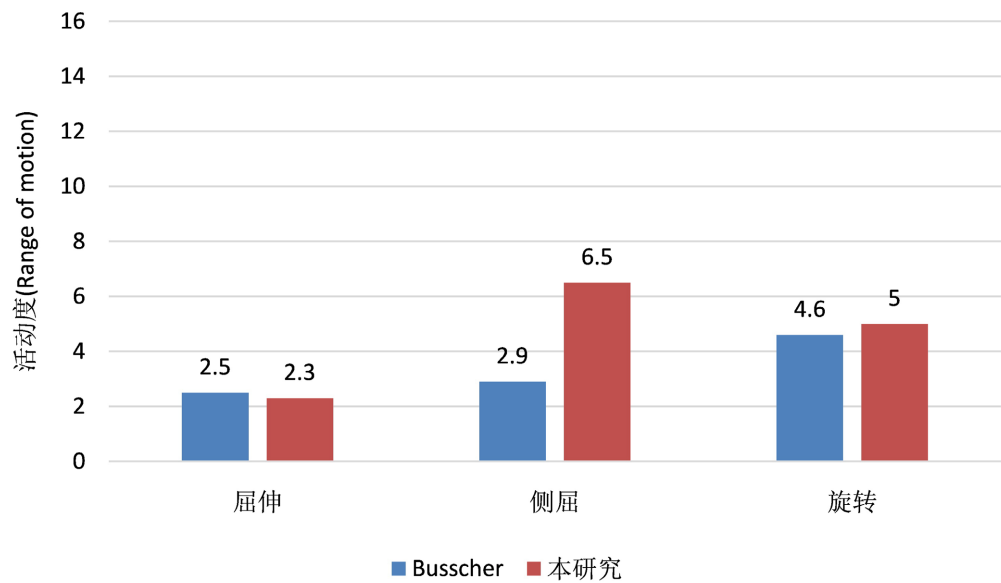


Figure 3. Comparison of the range of motion in T5-T8 segments
图 3. T5-T8 节段活动度对比

4.3. T9-T12

T9-T12 在施加 4000 N*mm 力矩后，模拟前屈，后伸，左侧屈，右侧屈，左旋转，右旋转的活动度如表 5 所示。

Table 5. Range of motion in T9-T12 segments
表 5. T9-T12 的活动度

工况	屈伸	侧屈	旋转
活动度(°)	1.6	3.3	3.4

将所得数据与 Busscher 等人[15]的结果相比较，结果如图 4 所示。

4.4. L1-L5

L1-L5 在施加 4000 N*mm 力矩后，模拟前屈，后伸，左侧屈，右侧屈，左旋转，右旋转的活动度如表 6 所示。

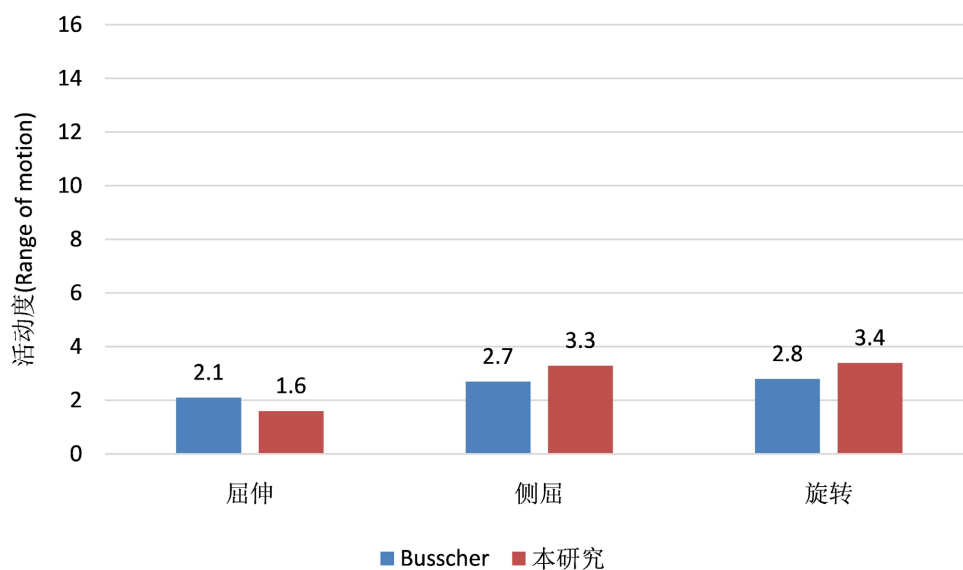


Figure 4. Comparison of the range of motion in T9-T12 segments

图 4. T9-T12 节段活动度对比

Table 6. Range of motion in L1-L5 segments

表 6. L1-L5 的活动度

工况	屈伸	侧屈	旋转
活动度(°)	2.0	8.2	4.5

将所得数据与 Busscher 等人[15]的结果相比较, 结果如图 5 所示。

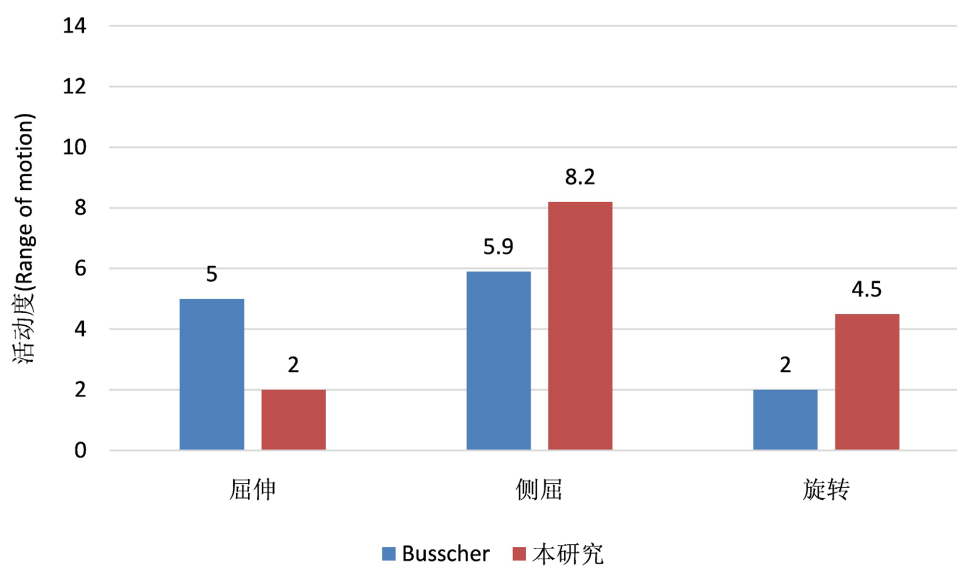


Figure 5. Comparison of the range of motion in L1-L5 segments

图 5. L1-L5 节段活动度对比

5. 结论

除 T5-T8 侧屈的活动度外, T1-T4, T5-T8, T9-T12 节段的活动度与 Busscher 的结果差距极小($<1^\circ$),

但 L1-L5 节段与 Busscher 的结果差距较为明显($>2^\circ$)。这说明该模型正常节段活动度几乎未受到侧凸的影响。但是具有侧凸的节段,其活动度数值会受到一定影响。

6. 讨论

总体看, T1-T12 的活动度与 Busscher 的结果十分接近,但是 T5-T8 的侧屈活动度数值较为特殊,与 Busscher 的实验结果差距很大。结合二者实验,导致出现该情况的原因可能如下: 1) 研究对象不同。Busscher 采用的实验对象是成年男性尸体的脊柱,其年龄在 50 岁以上。而本实验所采用的是一名青少年女性的脊柱。研究对象在性别,年龄,体重等方面均有明显差异。2) 研究方法不同。Busscher 采用的是四点弯曲装置对脊柱各节段进行活动度测试,而本实验是采用有限元模拟手段,利用软件模拟活动度。

在医学领域,人体脊柱在结构剖析与受力情况十分复杂,使用传统实验方法效率低下,且无法保证结果的正确性与精确度。三维有限元法可以模拟各种几何形状复杂的结构,分析多种工况下的应力分析,有效地保证了结果的正确性与精确度,可动态反映实验模型在外部载荷下的内部应力变化状态,以及在改变相关参数的条件下,可重复进行相关实验,对其进行连续研究。该研究技术日臻成熟,已为脊柱侧凸的病理机制、支具的设计及应用和手术方式的选择等研究提供了有力的支持[15]。

但是,有限元分析方法必然也存在一些不足。例如,个体之间脊柱会存在差异,用过往的设置材料参数可能并不能很好地反映目前在研究的病例,并且使用何种类型的单元,多少数量的网格密度等基本都要依靠实验者的主观经验。除此之外,由于人体真实结构的复杂性,不太可能将人体内所有的组织都包含在有限元模型中。例如肌肉组织,其在支具负载部分中的影响十分重要,但是很多情况下由于肌肉组织建模过程十分复杂,其往往会在建立脊柱有限元模型时会被忽略[16]。另外,本实验模型还缺乏椎间盘中的终板结构,在一定程度上也会影响实验最终结果。有限元模型的不断完善乃至技术的进步,都是今后需要不断努力的方向。

基金项目

国家重点研发计划(编号: 2023YFC2507702)。

参考文献

- [1] 张聪,田姗姗,康杰,等. 特发性脊柱侧凸患者背痛强度与临床和心理社会因素的关系[J]. 颈腰痛杂志, 2024, 45(4): 652-656.
- [2] Patel, A., Oh, J., Leven, D., et al. (2018) Anatomical Modifications during the Lateral Transposas Approach to the Lumbar Spine. The Impact of Vertebral Rotation. *International Journal of Spine Surgery*, 12, 8-14.
- [3] Xu, L., Qiu, Y., Chen, Z., Shi, B., Chen, X., Li, S., et al. (2018) A Re-Evaluation of the Effects of Dual Growing Rods on Apical Vertebral Rotation in Patients with Early-Onset Scoliosis and a Minimum of Two Lengthening Procedures: A CT-Based Study. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 22, 306-312. <https://doi.org/10.3171/2018.3.peds1832>
- [4] 褚浚波, 梁英豪, 梁淑慧, 等. 基于改进 U-Net 和 X 光片的脊柱侧弯 Cobb 角自动测量算法研究[J/OL]. 基因组学与应用生物学: 1-15. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rdiHbV4QUxaPz3mUeSQBIY1891yLvdM337G3L-AOG8Gi4RuCGj9vTPaFXdveaNOrrtbleLUpMzMgOYw6rpf4P1o-tArS49YzTiji-hSRWjVpjiNjLTAns5i6cNV8ik3BBxa3yAeQaF8CP37Fwhlr7lx664mJWv5_D6Msf4QrCi=&uniplatform=NZKPT, 2024-05-14.
- [5] 张瑜, 李忠海. 三维有限元法在脊柱生物力学中的应用现状[J]. 中国骨与关节杂志 2020, 9(3): 220-224.
- [6] Brekelmans, W.A.M., Poort, H.W. and Slooff, T.J.J.H. (1972) A New Method to Analyse the Mechanical Behaviour of Skeletal Parts. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 43, 301-317. <https://doi.org/10.3109/17453677208998949>
- [7] 赵俊勇, 赵曰峰, 司海朋. 有限元法探究骨质疏松患者在不同内固定方式下的稳定性[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2019, 34(2): 236-242.
- [8] 李硕, 苏鹏, 张力, 等. 三维重建和有限元分析股骨髁上截骨对矫治膝内翻有积极作用[J]. 中国组织工程研究,

- 2022, 26(6): 858-863.
- [9] Viviani, G.R., Ghista, D.N., Lozada, P.J., Subbaraj, K. and Barnes, G. (1986) Biomechanical Analysis and Simulation of Scoliosis Surgical Correction. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **208**, 40-47. <https://doi.org/10.1097/00003086-198607000-00008>
 - [10] Périé, D., Aubin, C.E., Lacroix, M., Lafon, Y. and Labelle, H. (2004) Biomechanical Modelling of Orthotic Treatment of the Scoliotic Spine Including a Detailed Representation of the Brace-Torso Interface. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **42**, 339-344. <https://doi.org/10.1007/bf02344709>
 - [11] 唐明星. Lenke1A-型青少年特发性脊柱侧凸有限元模型建立及其生物力学研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009.
 - [12] 易红蕾. 新型脊柱侧凸三维矩形支具的有限元分析、顺应性监测及临床应用初探[D]: [博士学位论文]. 重庆: 第二军医大学, 2014.
 - [13] 辛大奇. LENKE3 型成人特发性脊柱侧凸有限元模型的建立及手术设计、模拟[J/OL]. 2019-09-30. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=rdiHbV4QUxbn6nvGB-rgCKXcawMlnwtROq8f6oGGgJ96HQA8V3ZcFOB0PgWHRbfwUoQd5n6DdTkbiPg9QbQAp97CymoL-Cucw0GeJFaknPRJnTv9lBr1SkTKBySi_TltH-pOHDCdpLhWYEnM_2V6ECn97VoEBgMQBzXubqjsMdGnA=&uniplatform=NZKPT, 2019-09-30.
 - [14] Gould, S.L., Cristofolini, L., Davico, G. and Viceconti, M. (2021) Computational Modelling of the Scoliotic Spine: A Literature Review. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, **37**, e3503. <https://doi.org/10.1002/cnm.3503>
 - [15] Busscher, I., van Dieën, J.H., Kingma, I., van der Veen, A.J., Verkerke, G.J. and Veldhuizen, A.G. (2009) Biomechanical Characteristics of Different Regions of the Human Spine: An *in Vitro* Study on Multilevel Spinal Segments. *Spine*, **34**, 2858-2864. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181b4c75d>
 - [16] 范宁, 藏磊, 海涌, 杜鹏, 袁硕. 脊柱侧凸有限元建模方法的应用进展[J]. 中国骨伤, 2018, 31(4): 391-394.