doi:10.11659/jjssx.05E024071

·综 述·

基于多模态影像融合技术的全腰椎有限元分析研究进展

叶建亚[1,2],姚庆强[1],刘 畅[1] (1.南京医科大学附属南京医院/南京市第一医院骨科,江苏 南京 210001;2.淮安市淮安医院骨科,江苏 南京 223200)

[摘 要] 多模态影像融合技术是一种结合多种医学影像手段以获取综合诊断信息的关键技术,目前已广泛应用于临床疾病研究。有限元分析本质上是一种微分方程的数值求解方法,通过与多模态影像融合技术结合来模拟各种生理及病理场景,目前已应用于全腰椎等多个医学领域,在解剖学研究、生物力学研究、疾病的发生发展中起到重要作用。该技术组合能够在三维空间中模拟椎体承压、椎间盘退变及韧带骨化等病理过程,为力学机制揭示、风险评估和手术方案设计提供了精准支撑。本文通过文献搜集整理,系统梳理了基于多模态影像融合的有限元分析在全腰椎不同解剖单元中的应用进展,分析了其在模型构建、材料特性赋值、验证方法与临床转化中的关键问题。有限元分析与多模态影像融合技术的结合,为临床工作者提供更多腰椎疾病诊疗依据,应用前景广阔。

[关键词] 多模态影像融合技术;有限元分析;腰椎;应用解剖学;生物力学分析

[中图分类号] R318;R322 [文献标志码] A [收稿日期] 2024-05-15

Advance in finite element analysis of the whole lumbar spine based on multimodal image fusion technique

YE Jian-ya[1,2], YAO Qing-qiang[1], LIU Chang[1] (1. Department of Orthopedics, Nanjing First Hospital, Nanjing Medical University, Nanjing Jiangsu 210001, China; 2. Department of Orthopedics, Huai'an Huai'an Hospital, Huai'an Jiangsu 223200, China)

Abstract: Multimodal image fusion technique is a key technology that combines a variety of medical imaging methods to obtain comprehensive diagnostic information, which has been widely used in clinical disease research. Finite element analysis is essentially a numerical

[基金项目] 江苏省科技计划专项基金(BE2022718)

[通信作者] 姚庆强,E-mail:yaoqingqiang@126.com

[20] Kozlowski MT, Crook CJ, Ku HT. Towards organoid culture without matrigel[J]. Commun Biol, 2021, 4(1): 1387. doi: 10.1038/s42003-021-02910-8.

[21] Sandilya S, Singh S. Development of islet organoids from human induced pluripotent stem cells in a cross-linked collagen scaffold[J]. Cell Regen, 2021, 10(1): 38. doi: 10.1186/s13619-021-00099-z.

[22] Capeling MM, Czerwinski M, Huang S, et al. Nonadhesive alginate hydrogels support growth of pluripotent stem cell-derived intestinal organoids [J]. Stem Cell Reports, 2019, 12(2): 381-394. doi: 10.1016/j.stemcr.2018.12.001.

[23] Silva S, Bicker J, Falcão A, et al. Air-liquid interface (ALI) impact on different respiratory cell cultures [J]. Eur J Pharm Biopharm, 2023, 184: 62-82. doi: 10.1016/j.ejpb.2023.01.013.

[24] Kesimer M, Kirkham S, Pickles RJ, et al. Tracheobronchial air-liquid interface cell culture: a model for innate mucosal defense of the upper airways? [J]. Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol, 2009, 296(1): L92-L100. doi: 10.1152/ajplung.90388.2008.

[25] 彭欣玥,何耀红. 微流控芯片技术在急性呼吸窘迫综合征中的研究进展[J]. 中国医刊, 2024, 59(4): 364-369. doi: 10.3969/j.issn.1008-1070.2024.04.004.

[26] Zhu Y, Sun L, Wang Y, et al. A biomimetic human lung-on-a-chip with colorful display of microphysiological breath [J]. Adv Mater, 2022, 34(13): e2108972. doi: 10.1002/adma.202108972.

[27] Zamprogno P, Wüthrich S, Achenbach S, et al. Second-generation lung-on-a-chip with an array of stretchable alveoli made with a biological membrane[J]. Commun Biol, 2021, 4(1): 168. doi: 10.1038/s42003-021-01695-0.

[28] Dmytriw AA, Chibbar R, Chen PPY, et al. Outcomes of acute respiratory distress syndrome in COVID-19 patients compared to the general population: a systematic review and meta-analysis [J]. Expert Rev Respir Med, 2021, 15(10): 1347-1354. doi: 10.1080/17476348.2021.1920927.

[29] Lamers MM, van der Vaart J, Knoops K, et al. An organoid-derived bronchioalveolar model for SARS-CoV-2 infection of human alveolar type Ⅱ-like cells [J]. EMBO J, 2021, 40(5): e105912. doi: 10.15252/embj.2020105912.

[30] Leibel SL, Sun X. Halting SARS-CoV-2: lung organoids step up to the plate[J]. EMBO J, 2021, 40(5): e107651. doi: 10.15252/embj.2021107651.

[31] Salahudeen AA, Choi SS, Rustagi A, et al. Progenitor identification and SARS-CoV-2 infection in human distal lung organoids [J]. Nature, 2020, 588(7839): 670-675. doi: 10.1038/s41586-020-3014-1.

[32] Song J, Li M, Chen C, et al. Regulator of G protein signaling protein 6 alleviates acute lung injury by inhibiting inflammation and promoting cell self-renewal in mice[J]. Cell Mol Biol Lett, 2023, 28(1): 102. doi: 10.1186/s11658-023-00488-z.

[33] Liberti DC, Liberti Iii WA, Kremp MM, et al. Klf5 defines alveolar epithelial type 1 cell lineage commitment during lung development and regeneration[J]. Dev Cell, 2022, 57(14): 1742-1757. e5. doi: 10.1016/j.devcel.2022.06.007.

(编辑:刘 艺)

method for solving differential equations, which simulates various physiological and pathological scenarios through combining with multimodal image fusion technique. It has been applied to many medical fields such as the whole lumbar spine, and plays an important role in anatomical research, biomechanical research, and the occurrence and development of diseases. This combination of technologies can simulate pathological processes such as vertebral loading, intervertebral disc degeneration and ligament ossification in three-dimensional space, thereby offering precise support for the elucidation of mechanical mechanisms, assessment of risk and design of surgical plan. This paper systematically reviewed the advances of finite element analysis based on multimodal image fusion in different anatomical units of the whole lumbar spine through literature collection and collation, and analyzed its key problems in model construction, material property assignment, validation methods and clinical transformation. The synergy of finite element analysis and multimodal image fusion provides clinicians with more basis for the diagnosis and treatment of lumbar spine diseases, and has broad application prospects.

Keywords: multimodal image fusion technique; finite element analysis; lumbar spine; applied anatomy; biomechanical analysis

腰椎的应用解剖结构主要涵盖骨性结构、椎管和椎间孔以及神经分布等,这些解剖结构在腰椎的运动节段和节段性运动中起着关键作用[1]。常见腰椎疾病包括腰椎退行性骨关节病、腰椎间盘突出症、腰椎节段不稳和退变性脊柱侧弯等[2]。腰椎疾病的发病机制复杂,病程可持续数月至数年,严重影响患者的日常生活,且其临床发病率和复发率均较高,近年来更呈现年轻化趋势,给社会、医疗组织及个人带来沉重经济负担[3]。因此,疾病的早期诊断和治疗至关重要[4-5]。腰椎疾病包括急性创伤和慢性损伤[6],无论是急性还是慢性,均需借助多种医学影像学技术对腰椎或受损部位进行检测,以辅助临床诊断与治疗。慢性损伤是由长时间的生物力学负荷异常、细胞外基质降解、组织水分丧失以及代谢紊乱等引起的椎间盘退行性改变和椎体结构重塑所致。椎间盘在适应生理负重变化时产生的应力调整及对损伤的反应,使其常处于损伤与修复的不平衡状态,需对其动态变化进一步监测。

然而,由于腰椎的解剖结构复杂,各部分性质差异显著,目前尚无法通过单一的影像学技术对整个腰椎进行全面探查。1985年影像信息融合出现,在一定程度上解决了这一难题。随着研究的深入,目前已开发出多模态影像融合等技术与有限元分析结合的方法,通过构建全腰椎有限元模型模拟实际情况,如腰椎的生理过程、退行性疾病、结构性畸形或感染等多种腰椎疾病和损伤机制以及外科手术的疗效等,以辅助临床研究[7]。

1 全腰椎的两种生物力学分析方法

目前国内外开展较多的全腰椎生物力学分析方法主要包括实验生物力学和理论生物力学,其中实验生物力学通过人体或动物标本的体内外试验等方式直接分析腰椎力学特性,理论生物力学则借助有限元分析等数学模型模拟腰椎结构的力学行为,这两种方法为研究腰椎功能及损伤发生机制提供了重要手段,对腰椎疾病的诊断与治疗具有重要意义[8-10]。

1.1 实验生物力学分析

腰椎运动节段对腰椎有限自由运动的控制在腰椎力学中至关重要。20世纪90年代起,医学界开始重视腰椎解剖学的定量研究[9,11],此后众多学者通过离体组织、动物组织、整块骨骼及压缩实验等开展大量人体及动物体内外试验,腰椎生物力学分析得到了里程碑式的进展[10,12-16]。但在这些试验中,使用的动物组织、整块骨骼等标本存在固有的局限性,主要包括样品经处理、储存后与实际人体组织的生物力学特性不完全一致,这可能影响数据分析的准确性和试验结果的可重复性。由于人类腰椎标本难以获取,许多生物力学性能测试和应力-应变分析研究通过有限的尸体标本或模拟实验开展[11,17-19],以评估椎体和椎间盘特性,而对椎间关节的研究相对较少。传统解剖学认为,椎间关节的主要作用是抗旋转和抗剪切,其在承受轴向压应力方面作用有限,因而并非主要的承重结构。但Li等[20]发现,椎间关节在不同个体间具有明显的结构差异(如关节面几何、方向、间距或关节突起形态不同),这类结构变异会直接影响其力学行为(如接触面积、受力分布和运动限制),这一点已在多项有限元分析及力学实验中得到证实[21-23]。传统的离体实验在操作过程中仍面临诸多挑战,包括组织变异性、测试设置复杂性、成本高、可测量的生物力学参数和实验可重复性不理想等问题[13-16]。目前的研究表明,可获取的标本常存在骨骼质量较差,难以代表不同年龄段腰椎情况;动物腰椎标本受力模式与人类存在显著差异,无法完全替代人类标本;不同文献中压缩试验技术存在显著的研究间差异,具体体现在加载速率、边界条件设定、标本处理方式等方面,这可能影响实验结果的可比性与重复性[24]。为提高研究的一致性和数据的可信度,未来应建立统一的测试标准或实验流程,并结合相关数字图像技术、高精度传感手段等对

加载过程进行精准监测,以推动该领域研究的标准化,提高可重复性。

1.2 理论生物力学分析

有限元分析利用数学方法对真实物质进行模拟,基于相互作用的简单元素即可以用有限数量的未知量去接近无限未知量的真实系统,具有方便性、实用性和有效性。在1974年,Belytschko等[14]首次将有限元分析技术应用于脊柱生物力学领域,成功构建首个纯骨性脊柱有限元模型。随着计算能力、工程建模和分析软件研究的进步,骨性结构的建模方法已日趋成熟,椎间盘、韧带及软骨等组织的有限元分析数据不断积累,所建立的三维模型更加真实、精细,目前已作为脊柱和骨科生物力学研究的常用方法[15]。

腰椎的有限元分析核心流程通常包括3个关键阶段:首先是前处理阶段,需要基于临床影像数据构建具有生物学真实性的三维解剖模型,并进行几何网格划分与材料属性赋值定义;其次是求解阶段,通过边界条件设置和载荷施加,将各单元刚度矩阵组装为全局刚度矩阵,并求解对应的有限元方程组组装全局刚度矩阵,并对离散后的系统求解有限元方程组;最后进入后处理阶段,对经计算得到的位移、应力、应变等力学响应指标进行可视化、定量分析与科学评估,以支持临床或生物力学研究结论的形成[16]。

目前,腰椎有限元分析的应用已拓展至多个重要领域:在基础研究层面,用于探究腰椎在生理状态下的力学特性;在临床实践方面,能够为手术方案设计、手术器械固定方式选择提供理论指导;在手术评估领域,可模拟不同术式并对比术后效果;在医疗器械研发方面,可用于支持固定系统与人工假体的性能研究;此外,还广泛应用于腰椎骨折(包含稳定性与不稳定性骨折)及脱位等病理状态的生物力学分析[17]。尽管有限元分析在腰椎研究中发挥着重要作用,但仍存在模型简化、材料属性不确定、边界条件设置不准确等问题。近年来有限元分析与多模态影像融合技术的结合受到关注,这种融合可以提高模型的精确度和临床适用性,更精准地模拟复杂的生物力学环境[25]。例如,有限元分析结合CT影像用于个体化手术方案的制定,同时为腰椎骨折稳定性评估提供了更可靠的量化依据,有效促进了实验生物力学和理论生物力学研究的协同发展[26-28]。

2 多模态医学影像融合结合有限元分析在腰椎生物力学中的应用

医学影像融合技术以挖掘深层医学信息、提升临床应用价值为核心目标,在疾病诊断与治疗决策中发挥关键作用[29]。单一模态影像,如基于CT扫描生成的腰椎有限元分析模型,虽然能提供椎骨的三维几何形状及其密度数据,但在呈现椎间盘细节特征方面存在局限,且辐射危害会给受试者尤其是儿童群体,带来潜在健康风险。因此,多模态医学影像融合技术凭借信息互补性与低辐射特性,成为医学影像领域的研究前沿[29-30]。多模态医学影像融合结合有限元模型,能够更好地适应腰椎等的复杂几何形状,建立精确的结构模型,以模拟不同临床和手术条件。通过多次测量相关生物力学参数,不断优化材料特性和模型参数,可以更准确地评价结构性能和安全性,在预测承载强度、模拟动力响应及评估长期力学稳定性等方面具有显著优势[31]。此外,Kikuchi等[25]证实了离体力学试验与有限元分析之间存在强相关性,为该技术的可靠性提供了依据。

椎体作为腰椎的主要承重结构,其生物力学特性与骨折风险密切相关,现有技术正在努力提高骨折风险预测的精准度[20,32-34]。椎间盘退行性变显著影响腰椎的稳定性,有限元分析结合MRI可帮助模拟其在不同负荷下的力学行为和应力响应特征,从而为临床治疗方案的优化提供可靠依据[35-36]。腰椎韧带在维持脊柱稳定性中起重要作用,但其研究相对较少,未来需进一步探索其生物力学特性[37-43]。

2.1 椎体

腰椎的椎体较大且厚,主要由松质骨组成,外层的密质骨较薄。从侧面看,椎体略呈楔状,横径大于前后径,并从上到下逐渐增大,相邻椎体间由椎间盘相连。椎体是脊柱的应力主体,也是椎体背侧中空的原因[20]。Shin等[44]通过有限元建模证实,椎体内部的空腔结构会影响其应力分布特征,包括应力峰值的大小与位置。在压缩载荷作用下,椎体内产生压应力和拉应力。外层皮质骨形成的封闭性薄壳结构对内部松质骨产生约束与支撑作用,提升了整体的抗压刚度与硬化能力,从而增强了椎体对载荷的承受能力,皮质骨与松质骨共同承担了45%~75%的椎体应力[33]。若骨量减少或骨强度下降,如在骨质疏松状态下,骨折风险显著升高,常表现为楔形骨折。因此,对高危群体(老年人或骨质疏松症患者等)提前进行骨折风险评估至关重要,以便为其提供及时的干预措施[34]。

目前,双能X射线吸收测定法(dual-energy X-ray absorptiometry,DXA)和定量计算机断层扫描(quantitative computed tomography,QCT)是临床骨密度测量的最常见方法。但骨密度仅能反映椎体内矿物质含量

的平均值,无法全面评估屈曲负荷、椎体力学强度等引发楔形骨折的关键因素。生物力学CT(biomechanical CT,BCT)技术基于QCT,结合有限元分析方法,充分考虑骨密度、椎体几何形状和负荷条件,并量化与骨折相关的骨强度参数,有望与传统的DXA及QCT结合,为临床提供更为精准的骨折风险预测手段。

椎体的生物力学研究已经较为深入,但在探讨其与年龄、生活习惯等因素的关系方面,尤其是基于亚洲人群的有限元分析数据仍显不足。此外,椎间盘的营养来源于椎体,结合有限元分析与DXA及QCT技术,有望更深入地研究椎间盘的衰老与退变,并应用于临床[20,33-34,44]。

2.2 椎间盘

椎间盘由终板、纤维环和髓核组成。受力异常时终板和髓核之间的力会发生改变,可能影响纤维环的营养供应,引发椎间盘退行性变(intervertebral disc degeneration,IVDD)。该椎间盘应力集中度较高时,营养供应不足的纤维环易破裂,髓核沿着破裂区域与椎间盘分离,直至椎间盘突出,导致腰椎的生物力学特征发生变化。有限元分析在退行性椎间盘疾病研究中具有重要价值,可用于探究以下问题:①病因,包括生物学和生物力学发病机制;②IVDD的生物学、生物化学和生物力学方面特性;③生物疗法和手术治疗的效果。

Masni等[35]通过在材料中引入退化因子,基于成年男性的CT影像图像构建有限元模型,模拟伸展、屈曲、侧弯和轴向旋转等运动状态,研究不同程度的IVDD,结果显示,髓核和正常的椎间盘内压在维持椎间盘完整性和负载分布中发挥重要作用。在屈曲和轴向旋转过程中,若椎间盘结构破坏或内压异常增高,脊柱的稳定性可能下降。进一步研究发现,当椎间盘发生完全断裂或组织松弛时,椎体间的突起位移和剪切应变显著增加,表明椎间盘组织的力学特性(如弹性模量、应力-应变关系等)在退变过程中显著下降,从而影响整个腰椎系统的力学稳定性和负载分布;此外,椎体间的突起位移与剪切应变明显增加使其弹性模量降低、结构完整性受损,本构参数呈退化趋势,从而削弱其缓冲作用和负载均衡功能,增加腰椎结构失稳的风险。

目前临床最常用于椎间盘的探查方式是可以观察到椎间盘及其内部结构的MRI。有限元分析多数是基于MRI图像,常用的是多孔弹性非线性有限元模型、扩散-反应理论模型和细胞-活性耦合机械-电化学理论模型等。尽管有限元分析可以引入更复杂的假设条件、材料本构模型与网格划分策略,提高模型的生理真实度和预测精度,但这通常会显著增加计算资源消耗和求解时间,从而降低模拟效率。Yoon等[36]在多种软生物材料中开发并验证了基于MRI的有限元分析,能从MRI三维重建图像中快速生成网格,并用于实验工作流程校准的有限元分析中。该技术适用于任何可用MRI成像的肌肉骨骼软生物材料,模型的运行缩短至10 min以内,有助于识别急性损伤等高负荷因素导致的椎间盘病变,为临床医生制定诊疗方案提供有力支持。

2.3 韧带

椎骨之间由前纵韧带和后纵韧带相连,而椎弓之间则依靠黄韧带、棘间韧带、横突间韧带、棘上韧带等结构相互连接。这些韧带限定了腰椎的活动范围,在正常生理状态下,可有效避免邻近神经结构受损。基于既往韧带拉伸生物力学测试研究,Wiczenbach等[37]通过有限元分析法,对韧带的正交各向异性材料特性和非线性应力-应变行为进行模拟优化,从而更精准地模拟人体腰椎在不同载荷和力矩作用下的力学响应。

临床数据显示,近年来,腰椎疾病呈现年轻化趋势,接受手术治疗的患者数量显著增加,腰椎韧带骨化症发生率也随之攀升[38-39]。有研究显示,黄韧带和后纵韧带联合骨化会导致脊髓型颈椎病以及其他严重后果[40-41]。Doi等[42]通过基于CT和DXA的有限元模型测量发现,韧带骨化与性别、骨强度和骨矿物质状态无关,但可能与全身代谢紊乱具有一定相关性[43-44]。腰椎韧带结构和功能较为复杂,但其相关研究相对匮乏,多作为椎体或椎间盘研究的附属内容。有研究发现,脊柱韧带内存在力学感受器,这提示韧带不仅是维持腰椎弹性稳定的结构,可能还具有更为重要的生理功能[45-46]。因此,脊柱韧带的定量解剖学、适应性和本体感受特性、生物力学特性都应成为未来腰椎有限元模型研究的重点。

3 总结与展望

有限元分析已成为骨科领域的强大工具,在腰椎疾病的诊疗中,多模态医学影像融合和有限元模型的结合,为骨科和腰椎研究提供了重要技术支撑。目前已经创建的一系列有限元模型,在脊柱侧弯、椎体骨折、椎间盘退变以及骨质疏松症等疾病的研究中应用广泛[47]。但有限元模型本质上是对真实生理条件的数字化模拟,并不能完全复制体内真实情况。因此,其在生物力学特性模拟方面,仍存在诸多难以攻克的技

术瓶颈。模型的准确性还需要通过更多的各类人群多模态医学影像融合数据来进一步提高,并基于临床和实验室数据进行有限元模型验证。此外,模型需要根据每例患者的年龄进行分层构建。受限于尸体标本的年龄结构,目前关于年轻人群腰椎生物力学的数据较缺乏,这限制了模型在该群体中的应用[48],影响其在该年龄段的精准性。同时,新型材料特性的探索、动态腰椎力学响应的精确获取,也为有限元模型优化注入了新动能。且有必要对多模态医学影像融合和有限元分析方法学的关键技术环节进行标准化,并将当前研究中提出的潜在干预阈值与后续系统研究相结合,验证其科学性与临床适用性,以明确有限元分析的诊疗指导价值[49]。未来,随着多模态影像融合技术与有限元分析的深度融合与迭代升级,这一技术体系有望在个性化医疗方案制定、精准手术规划及创新疗法设计等领域实现突破,为腰椎疾病患者带来更高效、精准的诊疗服务,推动骨科医学迈向新高度。

为了符合医学伦理要求,需通过改进成像硬件和优化辐射剂量方案,进一步减少患者的辐射暴露,从而提升多模态医学影像融合技术及其衍生方法在临床中的接受度和应用价值。未来,随着多模态影像融合技术与有限元分析的不断发展和优化,这一技术组合有望在个性化医疗、手术精准规划以及新型治疗方法的设计中发挥更加重要的作用,从而进一步提升腰椎疾病的诊疗水平和患者预后。

综上所述,多模态影像融合技术的有限元分析已在腰椎疾病诊疗中展现出显著优势与临床价值,具有巨大的应用潜力和广阔的发展前景。

[参考文献]

[1] Zheng Z, Ma R, Zhang R, et al. Anatomical study and clinical significance of rami communicantes of the lumbar spine[J]. Reg Anesth Pain Med, 2022, 47(4): 253-258. doi: 10.1136/rapm-2021-103379.

[2] Yasuhara T, Sasada S, Date I. Lumbar degenerative disease: key for diagnosis [J]. No Shinkei Geka, 2021, 49 (6): 1233-1245. doi: 10.11477/mf.1436204510.

[3] 刘智伟,白晓亮,孔亚荣,等. PTED治疗对腰椎间盘突出症IL-6、HMGB-1、IL-17水平的影响[J]. 分子诊断与治疗杂志,2024,16(1):149-152. doi:10.3969/j.issn.1674-4926.2024.01.032.

[4] 拓一帆,吴继德,胡利红,等. 髂骨与钛网支撑植骨治疗胸、腰椎结核的疗效对比[J]. 宁夏医科大学学报,2023,45(6):619-625. doi:10.16050/j.cnki.issn1674-6309.2023.06.019.

[5] 杨雯栋,冯 敬,杨启远,等. 老年退行性腰椎管狭窄症患者围手术期心理状况评估[J]. 四川精神卫生,2017,30(4):345-347. doi:10.3969/j.issn.1007-3256.2017.04.016.

[6] Stephens ME, O'Neal CM, Westrup AM, et al. Utility of machine learning algorithms in degenerative cervical and lumbar spine disease: a systematic review[J]. Neurosurg Rev, 2022, 45(2): 965-978. doi: 10.1007/s10143-021-01598-7.

[7] Naoum S, Vasiliadis AV, Koutserimpas C, et al. Finite element method for the evaluation of the human spine: a literature overview[J]. J Funct Biomater, 2021, 12(3): 43. doi: 10.3390/jfb12030043.

[8] Watt AA, Callaway AJ, Williams JM. In vivo through-range passive stiffness of the lumbar spine: a meta-analysis of measurements and methods[J]. Med Biol Eng Comput, 2022, 60(8): 2133-2157. doi: 10.1007/s11517-022-02609-w.

[9] Panjabi MM, Goel V, Oxland T, et al. Human lumbar vertebrae: quantitative three-dimensional anatomy[J]. Spine, 1992, 17(3): 299-306. doi: 10.1097/00007632-199203000-00013.

[10] Ghezelbash F, Schmidt H, Shirazi-Adl A, et al. Internal load-sharing in the human passive lumbar spine: review of in vitro and finite element model studies [J]. J Biomech, 2019, 102: 109441. doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.109441.

[11] Panjabi MM, Oxland TR, Takata K, et al. Articular facets of the human spine: quantitative three-dimensional anatomy [J]. Spine, 1993, 18(10): 1298-1310. doi: 10.1097/00007632-199308000-00014.

[12] Bhattacharya S, Dubey DK. A multiscale investigation into the role of collagen-hyaluronan interface shear on the mechanical behaviour of collagen fibers in annulus fibrosus-Molecular dynamics-cohesive finite element-based study[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2023, 147: 106147. doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.106147.

[13] Miyagi M, Ishikawa T, Kamoda H, et al. ISSLS prize winner: disc dynamic compression in rats produces long-lasting increases in inflammatory mediators in discs and induces long-lasting nerve injury and regeneration of the afferent fibers innervating discs: a pathomechanism for chronic discogenic[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37(21): 1810. doi: 10.1097/BRS.0b013e31825d1c9a.

[14] Belytschko T, Kulak RF, Schultz AB, et al. Finite element stress analysis of an intervertebral disc[J]. J Biomech, 1974, 7(3): 277-285. doi: 10.1016/0021-9290(74)90020-0.

[15] Qiu S, Shi C, Anbazhagan AN, et al. Absence of VEGFR-1/Flt-1 signaling pathway in mice results in insensitivity to discogenic low back pain in an established disc injury mouse model[J]. J Cell Physiol, 2020, 235(6): 5305-5317. doi: 10.1002/jcp.29431.

[16] Zhao S, Arnold M, Ma S, et al. Standardizing compression testing for measuring the stiffness of human bone[J]. Bone Joint Res, 2018, 7(8): 524-538. doi: 10.1302/2046-3758.78.BJR-2017-0328.R1.

[17] Seyedhoseinpoor T, Taghipour M, Dadgoo M, et al. Alteration of lumbar muscle morphology and composition in relation to low back pain: a systematic review and meta-analysis [J]. Spine J, 2022, 22(4): 660-676. doi: 10.1016/j.spinee.2021.11.008.

[18] Lai O, Chen Y, Chen Q, et al. Cadaveric biomechanical analysis of multilevel lateral lumbar interbody fusion with and without supplemental instrumentation[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2021, 22(1): 455. doi: 10.1186/s12891-021-04031-9.

[19] Mcmains MC, Jain N, Malik AT, et al. A biomechanical analysis of lateral interbody construct and supplemental fixation in adjacent-segment disease of the lumbar spine[J]. World Neurosurg, 2019, 128: e694-e699. doi: 10.1016/j.wneu.2019.04.237.

[20] Li J, Huang S, Tang Y, et al. Biomechanical analysis of the posterior bony column of the lumbar spine [J]. J Orthop Surg Res, 2017, 12(1): 132. doi: 10.1186/s13018-017-0631-y.

[21] Masharawi Y, Rothschild B, Dar G, et al. Facet orientation in the thoracolumbar spine: three-dimensional anatomic and biomechanical analysis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(16): 1755-1763. doi:

10.1097/01.brs.0000134575.04084.

[22] Wangsawatwong P, de Andrada Pereira B, Lehrman JN, et al. Biomechanical effects of facet joint violation after single-level lumbar fusion with transpedicular screw and rod instrumentation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2023, 48(14): 1033-1040. doi: 10.1097/BRS.0000000000004698.

[23] Han Y, Yuan W, Sun S, et al. Effect of different loads on facet joint motion during lumbar lateral bending in sitting position[J]. J Orthop Surg Res, 2024, 19(1): 61. doi: 10.1186/s13018-024-04533-1.

[24] 欧阳钧,钱 蕾,孙培栋. 脊柱生物力学研究的回顾与展望[J]. 医用生物力学, 2021, 36(2): 169-176. doi: 10.3969/j.issn.1004-7220.2021.02.008.

[25] Kikuchi Y, Shimada M, Yamaguchi S, et al. Finite element analysis predictions in the canine lumbar spine are useful and correlate with ex vivo biomechanical studies[J]. Am J Vet Res, 2023, 84(11): ajvr.23.06.0125. doi: 10.2460/ajvr.23.06.0125.

[26] Doulgeris J, Lin M, Lee W, et al. Inter-specimen analysis of diverse finite element models of the lumbar spine[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 11(1): 41. doi: 10.3390/bioengineering11010041.

[27] Li S, Xu B, Liu Y, et al. Biomechanical evaluation of spinal column after percutaneous cement discoplasty: a finite element analysis[J]. Orthop Surg, 2022, 14(8): 1853-1863. doi: 10.1111/os.13314.

[28] Jeong JG, Kang S, Jung GH, et al. Biomechanical effect of disc height on the components of the lumbar column at the same axial load: a finite-element study[J]. J Healthc Eng, 2022, 2022: 7069448. doi: 10.1155/2022/7069448.

[29] Huang B, Yang F, Yin M, et al. A review of multimodal medical image fusion techniques[J]. Comput Math Methods Med, 2020, 2020(8): 1-16. doi: 10.1155/2020/4380901.

[30] Haribabu M, Guruviah V, Yogarajah P. Recent advancements in multimodal medical image fusion techniques for better diagnosis: an overview[J]. Curr Med Imaging, 2023, 19(7): 673-694. doi: 10.2174/1573405618666220606161137.

[31] Bhavani SV, Lonjers Z, Carey KA, et al. The development and validation of a machine learning model to predict bacteremia and fungemia in hospitalized patients using electronic health record data[J]. Crit Care Med, 2020, 48(11): e1020-e1028. doi: 10.1097/CCM.0000000000004556.

[32] Pal GP, Cosio L, Routal RV. Trajectory architecture of the trabecular bone between the body and the neural arch in human vertebrae[J]. Anat Rec, 1988, 222(4): 418-425. doi: 10.1002/ar.1092220414.

[33] Che M, Wang Y, Zhao Y, et al. Finite element analysis of a new type of spinal protection device for the prevention and treatment of osteoporotic vertebral compression fractures[J]. Orthop Surg, 2022, 14(3): 577-586. doi: 10.1111/os.13220.

[34] Greve T, Rayudu NM, Dieckmeyer M, et al. Finite element analysis of osteoporotic and osteoblastic vertebrae and its association with the proton density fat fraction from chemical shift encoding-based water-fat MRI: a preliminary study[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2022, 13: 900356. doi: 10.3389/fendo.2022.900356.

[35] Masni A, Tanaka M. Biomechanical investigation on the influence of the regional material degeneration of an intervertebral disc in a lower lumbar spinal unit: a finite element study[J]. Comput Biol Med, 2018, 98: 26-38. doi: 10.1016/j.compbiomed.2018.05.001.

[36] Yoon DHE, Weber CI, Easson GWD, et al. Rapid determination of internal strains in soft tissues using an experimentally calibrated finite element model derived from magnetic resonance imaging[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(1): 57-65. doi: 10.21037/qims.2019.10.16.

[37] Wiczenbach T, Pachocki L, Daszkiewicz K, et al. Development and validation of lumbar spine finite element model[J]. Peer J, 2023, 11: e15805. doi: 10.7717/peerj.15805.

[38] Roiha M, Marjamaa J, Siironen J, et al. Favorable long-term outcome in young adults undergoing surgery for lumbar disc herniation[J]. Acta Neurochir (Wien), 2022, 164(12): 3155-3164. doi: 10.1007/s00701-022-05375-8.

[39] Maigne JY, Ayral X, Guérin-Surville H. Frequency and size of ossifications in the caudal attachments of the ligamentum flavum of the thoracic spine. Role of rotatory strains in their development. An anatomic study of 121 spines[J]. Surg Radiol Anat, 1992, 14(2): 119-124. doi: 10.1007/BF01794886.

[40] Kotani Y, Takahata M, Abumi K, et al. Cervical myelopathy resulting from combined ossification of the ligamentum flavum and posterior longitudinal ligament: report of two cases and literature review[J]. Spine J, 2013, 13(1): e1-e6. doi: 10.1016/j.spinee.2012.10.038.

[41] Peng YX, Zheng ZY, Wang Md WG, et al. Relationship between the location of ligamentum flavum hypertrophy and its stress in finite element analysis[J]. Orthop Surg, 2020, 12(3): 974-982. doi: 10.1111/os.12675.

[42] Doi T, Hirai S, Kaneko M, et al. Bone strength of the proximal femur in healthy subjects with ossification of the posterior longitudinal ligament[J]. Osteoporos Int, 2020, 31(4): 757-763. doi: 10.1007/s00198-019-05256-0.

[43] Fujita R, Endo T, Takahata M, et al. High whole-body bone mineral density in ossification of the posterior longitudinal ligament[J]. Spine J, 2023, 23(10): 1461-1470. doi: 10.1016/j.spinee.2023.06.006.

[44] 杜云峰,叶新华,成金罗. 2型糖尿病周围神经病变患者骨密度的变化[J]. 江苏大学学报(医学版), 2016, 26(6): 525-528. doi: 10.13317/j.cnki.jdmu.2016.06.018.

[45] Sterba M, Aubin CR, Wagnac E, et al. Effect of impact velocity and ligament mechanical properties on lumbar spine injuries in posterior-anterior impact loading conditions: a finite element study[J]. Med Biol Eng Comput, 2019, 57(6): 1381-1392. doi: 10.1007/s11517-019-01964-5.

[46] Shin DE, Lee Y, An HJ, et al. Trabecular structural difference between the superior and inferior regions of the vertebral body: a cadaveric and clinical study[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1238654. doi: 10.3389/fendo.2023.1238654.

[47] 廖亦佳,舒启航,王 程. 胸腰椎骨折三维有限元模型构建的研究进展[J]. 中南医学科学杂志, 2022, 50(1): 4. doi: 10.3969/j.issn.2096-5212.2022.01.002.

[48] Somovilla-Gómez F, Lostado-Lorza R, Corral-Bobadilla M, et al. Improvement in determining the risk of damage to the human lumbar functional spinal unit considering age, height, weight and sex using a combination of FEM and RSM[J]. Biomech Model Mechanobiol, 2020, 19(1): 351-387. doi: 10.1007/s10237-019-01215-4.

[49] Luo C, Jiang T, Tian S, et al. Finite element analysis of lumbar spine with different backpack positions in parachuting landing[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2021, 24(15): 1679-1686. doi: 10.1080/10255842.2021.1904436.

(编辑:刘 艺)