

颈椎运动学评价指标研究进展

顾江鹏^{1,2} 王飞^{1,2△} 冯伟¹ 杜俊杰³

[摘要] 颈椎运动学用来描述颈椎在空间中位置随时间的变化,利用运动学原理研究人体颈椎在正常的生理载荷和病理状态下运动的形态和大小。随着人们对颈椎运动学的研究加深,发现运动指标在颈椎疾病的诊断和疗效评估中有着重要作用。本文对颈椎运动范围、椎间运动质量参数、运动曲线、运动平滑度和速度的测量方法、临床应用进展进行综述,发现颈椎运动范围、运动曲线、速度和平滑度适用于各类颈椎疾患的辅助诊断和疗效评估,颈椎椎间运动质量参数对于提示颈椎退变、辅助设计椎间盘假体等具有很好的作用。各运动指标之间存在一定的联系,椎间运动质量参数的变化影响运动范围,运动范围变化影响运动曲线整体的变化。

[关键词] 颈椎;运动学;运动范围;瞬时旋转轴;平滑度;运动速度;运动曲线

[中图分类号] R681.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2024)01-0091-06

DOI: 10. 20085/j. cnki. issn1005-0205. 240118

Research Progress on Evaluation Indexes of Cervical Spine Kinematics

GU Jiangpeng^{1,2} WANG Fei^{1,2△} FENG Wei¹ DU Junjie³

¹ TCM Manipulative Orthopedics Therapy, Air Force Medical Center, Air Force Medical University, Beijing 100142, China;

² Fifth Clinical Medical College, Anhui Medical University, Hefei 230032, China;

³ Department of Orthopedics, Air Force Medical Center, Air Force Medical University, Beijing 100142, China.

Abstract Cervical kinematics is used to describe the change of the position of the cervical spine in space with time. The kinematics principle is used to study the shape and size of the human cervical spine under normal physiological load and pathological state. With the deepening of research on cervical spine kinematics, it has been found that motion indicators play an important role in the diagnosis and efficacy evaluation of cervical spine diseases. This article reviews the measurement methods and clinical application progress of cervical spine motion range, intervertebral motion quality parameters, motion curve, motion smoothness and velocity. It is found that the range of motion, motion curve, velocity and smoothness of cervical spine are suitable for the auxiliary diagnosis and efficacy evaluation of various cervical spine diseases. The quality parameters of cervical intervertebral motion have a good effect on suggesting cervical degeneration and assisting in the design of intervertebral disc prosthesis. There is a certain relationship between the motion indexes. The change of the intervertebral motion quality parameters affects the motion range, and the change of the motion range affects the overall change of the motion curve.

Keywords: cervical spine; kinematics; range of motion; instantaneous rotation axis; smoothness; speed of motion; motion curve

随着科技迅速发展,电子娱乐产品普及,伏案工作

时间延长,人口老龄化以及睡眠姿势不良,颈椎病患者率明显增高,且发病年龄有年轻化趋势。颈椎是脊柱中最灵活的部分,具有精确控制头部运动的功能,颈椎运动学知识对于颈椎病的诊断、治疗、预防有重要意义。本文就颈椎运动学评价指标在测量方法、临床应用方面的进展进行综述,为颈椎病的防治提供参考。

1 颈椎运动范围

1.1 运动范围的测量方法

随着对颈椎活动度(Cervical Range of Motion,

基金项目:全军后勤科研重点项目(BKJ20J004)

空军特色医学中心科技助推项目(2022ZTYB32)

¹ 空军军医大学空军特色医学中心中西医结合正骨科
(北京,100142)

² 安徽医科大学第五临床医学院

³ 空军军医大学空军特色医学中心骨科

△通信作者 E-mail: wf2008115@126. com

CROM)研究的进一步深入,惯性传感器设备、基于手机设计的软件以及动态运动分析系统成为测量颈椎活动度的新方法。颈椎活动度是临床上最常用的评估颈椎生理状态和损伤的指标,目前对于颈椎活动度测量主要分为整体活动度的测量和关节活动度的测量,而人们大多采集的颈椎活动度就是整体活动度,整体活动度的测量通常以头部的运动代替颈椎的活动,过去测量手段主要包括量角器、重力仪、颈椎活动度测量仪、X线测量法等二维运动分析法和电磁、超声、光学运动捕捉、CT三维重建等三维运动分析法^[1]。高照等^[2]提出了一种九轴惯性传感器的测量方法,通过计算头部和胸骨体的欧拉角差值获得颈椎活动度;Chalimourdas等^[3]也基于惯性设备测量颈椎活动度作了验证,发现惯性设备测量结果具有很好的信度和效度。随着智能手机的普及,更多基于手机设计的测量方法被开发,Li等^[4]设计了控制三台智能手机相机同时拍摄佩戴的三条标记线的特殊设备,提取三个角度照片的标记线,间接确定受试者颈椎活动度。Du等^[5]基于手机App设计了“G-Plus”软件,将手机放置于头部并打开App运行,做颈部运动的六个动作,这使得颈椎活动度测量更加方便,不局限于医院或实验室等场地,在户外损伤的情况下也可测量。以往许多实验测量通常是量化静态颈椎运动范围,Xu等^[6]发明了一套把时间因素考虑在内的动态颈椎运动分析系统(Analysis of Dynamic Cervical Spine Motion, ADCM),测量中将颈椎运动转化为波形,波高代表颈椎活动度,波宽代表颈椎活动频率,并且在实验中发现脊髓型颈椎病患者较正常人的波形更宽,这也证实了Liu等^[7]将颈椎活动度减少作为脊髓型颈椎病严重程度的独立预测因子的正确性。周捷等^[8]将动态骨骼肌肉综合分析系统测量颈椎运动范围与动态X线测量数据进行比较,发现两者结果没有差异性并且有很显著的相关性,从而证明动态运动分析系统的准确性和实用性。

1.2 颈椎运动模式

在颈椎的不同运动中,每个关节的贡献度并不相同,从而导致关节活动度的差异,并且有研究发现末端位置并不一定代表关节活动的最大位置。颈椎运动实验中发现,前屈后伸运动曲线类似一条抛物线,运动过程中,从Occ(枕骨)/C₁到C₂/C₃、从C₃/C₄到C₆/C₇呈递减趋势,其中C₄/C₅、C₅/C₆是运动的主要贡献者。在侧屈运动中,C₃/C₄、C₆/C₇贡献最高,介于11.7%~20.3%,但Occ/C₁、C₇/Th₁的运动最小,考虑是因为颈椎与头部和胸部的连接处有较大的附着力阻止其侧屈运动。在旋转运动中,寰枢关节在运动中贡献最高,达63%~73%,旋转角度达38.5°~65.8°,其余关节贡献10%或者更少^[9-12]。临床诊断中与颈部

运动范围相关的最大颈椎运动是在颈部运动的末端发现的,这种观点被用于测量颈椎整体的最大运动范围。Wang等^[13]发现在颈部运动过程中,关节运动的方向在前向关节运动(在颈部运动方向上的运动)和反向关节运动(运动方向与颈部运动方向相反)之间交替变化,由此可以发现颈椎关节运动最大位置不一定在颈部运动的末端。Andersen等^[14]将关节运动分为3个类型,分别是:1)C型,最大位置等于末端位置;2)S型,最大运动超过末端位置;3)A型,最大运动小于末端位置。实验发现C₀/C₁、C₄/C₅和C₅/C₆为C型运动,C₁/C₂、C₂/C₃、C₃/C₄为S型运动,C₆/C₇为A型运动。

1.3 运动范围的影响因素和临床作用

现有研究表明椎间盘的退变和韧带钙化水平与运动范围大小有着很高的相关性,单侧颈痛也会影响健侧的运动范围,并且发现运动范围对于术后颈椎序列的异常有很好的预测作用。Machino等^[15]在一项1211例大样本回顾性研究中证明,无症状颈椎间盘退变患者的关节活动度与退变程度存在某种关系,具体体现在椎间盘退变总评分与运动范围正相关,将两者的关系定量化。异位骨化一直是近期研究的热点之一,其以肌腱、韧带等软组织出现成骨细胞为主要特点,而这种骨化会导致关节的僵硬从而引起运动学改变。赵琦等^[16]在一项229例的回顾性研究中发现,后纵韧带骨化指数和前纵韧带骨化指数均与颈椎活动度负相关,并且前纵韧带指数是运动范围降低的危险因素,但项韧带骨化与运动范围并无明显相关性。Zhang等^[17]在一项8429例的Meta分析中发现项韧带与后纵韧带有强而稳定的相关性,认为项韧带可能作为后纵韧带骨化的早期预警信号,这也从侧面解释了赵琦等^[16]的研究结果。颈椎活动度对于正常人与颈椎疾病患者有很好的鉴别效果,过去的研究中已经证明颈椎活动度对于鉴别颈源性头痛、识别神经根型颈椎病、预测脊髓型颈椎病均有良好的效果。Kahlaee等^[18]比较了单侧非特异性颈痛患者疼痛区(Ipsilateral Side To Pain,ISP)、疼痛对侧区(Contralateral Side to Pain,CSP)与无症状组的颈部活动范围,发现单侧颈痛患者的疼痛区和疼痛对侧区区域的颈椎活动度、颈肌肌力、肩肌肌力均显著低于无症状组,并且疼痛区的运动范围显著低于疼痛对侧区,证明单侧颈痛患者在身体对侧的无痛区域存在着颈椎活动度和力量的缺失,支持了区域相互依赖的观点。

颈椎的矢状位序列直接影响颈椎力线分布,已有实验表明颈椎矢状位序列排列异常(例如颈椎后凸畸形)会导致患者生活质量下降、颈椎功能障碍指数增加,并且如今各类手术均会影响颈椎序列的排布,那么

找出导致颈椎序列术后排布异常的危险因素就显得格外重要。Fujishiro 等^[19]发现较大的颈椎前屈运动范围是椎板成形术后发生后凸畸形改变的危险因素,当前屈运动范围大于 40° 时,应谨慎行椎板成形术。Ono 等^[20]提出颈椎前凸比值(Cervical Lordosis Ratio, CLR)作为一个椎板成形术颈椎前凸丢失新的预测指标,颈椎前凸比值为前屈运动范围/ C_{2-7} 运动范围,其截断值为 68.9%,并且显示出很好的敏感度和特异度。Fujishiro 等^[21]研究了 111 例椎板成形术患者,并提出前屈活动度和后伸活动度之间的差值(Gap between Flexion and Extension Ranges of Motion, gROM)作为预测因子,受试者工作特征(ROC)曲线分析表明前屈活动度和后伸活动度之间的差值有很好的预测效果并且截断值为 27° 。颈椎活动度不光可以预测颈椎矢状位排列,对于整体脊柱的排列也有一定的相关性,枕-躯干的一致性常用来衡量脊柱整体的曲线。Zhao 等^[22]在一项 43 例强直性脊柱炎患者行经椎弓根椎体截骨术的回顾性研究中发现,枕-躯干不一致组较一致组在术前、术后及末次随访均显示出更小的颈椎运动范围,故认为强直性脊柱炎胸腰段后凸畸形的枕-躯干不一致是由于颈椎运动范围减小引起的。

2 颈椎椎间运动质量参数

旋转中心(Center Of Rotation, COR)、瞬时旋转中心(Instantaneous Center Of Rotation, ICR)、瞬时螺旋轴(Instantaneous Helical Axis, IHA)、瞬时旋转轴(Instantaneous Axis of Rotation, IAR)和螺旋运动轴(Helical axis of motion, HAM)等参数常被用来描述颈椎的椎间运动特征,被称为颈椎椎间运动质量参数(Parameters of Quality of Intervertebral Motion of the Cervical Spine, PQIMC)。

2.1 研究方法

在颈椎运动学的研究中,椎间运动特征的研究方法包括体内研究、体外研究以及有限元分析。体内研究常采用过屈过伸位和中立位 X 线或者双平面透视计算相关指标。体外研究常采用力矩控制模式和位移控制模式的生物力学实验,有限元分析则是通过建立颈椎模型计算相关指标^[23-26]。临床上常用的指标为旋转中心、瞬时旋转中心和瞬时螺旋轴/螺旋运动轴,旋转中心是评估颈椎椎间运动质量最简单最易于测量的参数,但不是最精确的,因为它不能显示动态过程变化。相反地,瞬时螺旋轴/螺旋运动轴和瞬时旋转中心因其详尽描述了颈椎 3D 运动学形态,成为评估颈椎椎间运动质量较准确的参数。

2.2 椎间运动质量参数的临床作用

深入认识正常人颈椎椎间运动特征,能够指导椎间盘假体的设计,使术后活动愈加趋向于正常人。Yu

等^[27]在一项 10 名正常人体内研究中发现屈伸运动和旋转运动的旋转中心并不处于同一位置,表现出旋转中心在旋转时较屈伸时后移的现象。同时发现在旋转运动中,越靠近椎间盘中心的旋转中心对应着越大的运动范围,提示颈椎各节段的旋转中心和运动范围具有节段水平和颈部运动的依赖性。Kim 等^[28]通过双平面 X 线研究发现,在屈伸运动下除 $C_{5/6}$ 节段,上位椎体到下位椎体瞬时旋转中心-Y 逐渐升高,瞬时旋转中心-X 逐渐向前移动。虽然对椎间运动模式的研究已经有了很多进展,但是彼此间的研究相互孤立,旋转中心、瞬时旋转中心和瞬时螺旋轴/螺旋运动轴之间是否有着相同的椎间运动模式仍不得而知。

颈椎椎间运动质量参数在颈部疼痛、颈椎退变人群中发生改变^[29],研究发现在运动范围正常的个别节段中仍可出现异常的运动模式,因此在评估颈椎活动度的质量方面,颈椎椎间运动质量参数在检测由颈椎疾患引起的颈椎活动度异常方面更敏感^[25]。颈椎椎间运动质量参数对提示颈部疼痛有一定的预测效果,并且发现疼痛患者运动变异性较低。Amevo 等^[30]报道旋转中心的异常与颈部疼痛显著相关,Alsultan 等^[31]通过螺旋运动轴比较慢性颈痛患者和正常人之间的运动差异性,利用螺旋运动轴的平均距离(Mean Distance, MD)和平均角度(Mean Angle, MA)进行评估,较低的平均距离和平均角度值意味着运动的可变性较小,发现在屈伸和旋转运动中,平均距离患者组较正常组小,仅在旋转运动中平均角度患者组小于正常组。Sang 等^[32]实验中发现屈伸过程中瞬时旋转中心运动路径在退变节段较正常明显前移,但在近端邻近节段却较正常明显后移,这种相邻节段的变化可能是维持颈椎平衡的代偿机制的结果,并且作者认为不单退变会引起瞬时旋转中心的变化,颈椎曲度的异常也会导致改变的发生。

颈椎椎间运动质量参数在评估不同人工椎间盘置换后颈椎椎间运动模式的变化方面有很重要的意义。Lee 等^[33]研究了多节段椎间盘置换术的患者,发现术后 C_{2-7} 运动范围与术后旋转中心-X 显著相关,而与旋转中心-Y 无明显相关性。但 Li 等^[34]在一项 38 例 Bryan 椎间盘置换术中却发现末次随访的旋转中心-Y 与运动范围负相关,与旋转中心-X 无明显相关性。Yan 等^[35]在一项 60 例单节段椎间盘手术患者的回顾性研究中发现,旋转中心在椎间盘术后较术前有前移和下移的趋向,并且发现偏移较大的患者均伴随颈椎活动度减少,预测较大的旋转中心变化可能是导致运动范围降低的重要危险因素。因此,维持旋转中心的位置对于保持颈椎运动范围,维持颈椎正常生理活动具有重要意义,并且不同的椎间盘假体也会导致颈椎

椎间运动质量参数的不同变化。Sang 等^[36] 在一项 Meta 分析中得出,旋转中心的位置变化与假体的类型密切相关,旋转中心位置在 ProDisc-C 假体术后表现出前移,在 Prestinge LP 假体术后上移,在 Bryan 假体术后无明显变化。而不同的假体根据设计类型分类,约束型或半约束型假体的旋转中心位置偏向前倾或者上移,非约束型假体的位置保持不变。

3 颈椎运动曲线

颈椎运动曲线指人体颈部在不同方向上的运动范围和幅度,能够预测颈部病变的方向,从而提示颈椎疼痛或损伤的位置。Li 等^[4] 通过颈椎标记帽,允许患者在 3D 空间内自由连续地移动颈部,利用三个不同方向上的相机从而得到一条类环形曲线。对于一个正常人来说,颈椎运动曲线是一条近似完整光滑的类环形曲线,但若患者颈部某一方向的脊髓、神经、肌肉发生病变,类环形曲线将在病变的方向上产生不规则缺口,以此评价颈椎的健康状况和恢复情况。Yang 等^[37] 采用六自由度电磁追踪系统(Electromagnetic Tracking System, ETS),通过电磁接收传感器信号,定义受试者弯曲颈椎为起始位置,要求其以正常速度做颈椎回转的主动最大运动将颈椎回到初始位置。颈椎回转的运动轨迹由横平面形成类椭圆形曲线,以 C_7 为颈部空间运动范围的顶点,椭圆形曲线为底面,构建类圆锥空间,此空间即颈部空间最大运动范围。类圆锥空间能够比类环形曲线更加直观地反映患者颈部病变情况,并且因为其空间数据特性,能够比平面数据包含更多的信息。

4 颈椎运动平滑度和速度

颈椎运动平滑度和速度在颈痛患者和健康人中存在差异,可以辅助诊断颈部疾病。健康人自主运动通常是连续的、平滑的,并且表现出近乎对称的、钟形的速度剖面。但颈部疾病患者的运动较正常人不太平滑,表现为速度剖面中的子运动,而这种子运动被认为是不规则的运动。运动平滑度从运动速度的时间历程中显现,当由于某些病理性原因导致运动间歇或精度下降时,钟形速度剖面被打乱。徐善达等^[38] 在一项小样本研究中发现颈型颈椎病在自然速度运动下屈伸和侧屈的速度均小于对照组,在最快速度运动下右旋转的运动速度小于对照组。Salehi 等^[39] 将冲击指数作为衡量一个动作是否流畅的结果指标,发现在屈伸和左旋转时,对照组相比于颈痛组动作更加流畅,而且颈痛患者在前屈和右旋时较正常人产生更低的峰值速度。Sarig 等^[40] 采用速度峰值个数(Number of Velocity Peaks, NVP)表示运动的平滑度,达峰时间百分比(Time to Peak Velocity Percentage, TPVP)表示速度剖面的加速和减速阶段的对称性。实验通过比较慢性

颈痛患者和健康人在虚拟现实(Virtual Reality, VR)的指引下做前屈后伸、左旋右旋四个动作,发现峰值速度、平均速度、速度峰值个数和达峰时间百分比(除左旋方向)的所有方向上患者组数值均显著小于健康对照组,而运动精度误差大于对照组。同时, Sarig 等^[41] 将视觉模拟量表(VAS)、颈部残疾指数(Neck Disability Index, NDI)和恐动症量表(Tampa Scale of Kinesiophobia, TSK)分别用来评价疼痛强度、残疾程度和运动恐惧,并且首次分析颈椎运动学指标与主观评价指标之间的关系,研究中 12 项运动学指标均与运动恐惧相关,仅有少数指标与疼痛强度、残疾程度相关。范围小、速度慢的颈部运动与运动恐惧的增加有很强的相关性。Hage 等^[42-45] 在一项干预性设计的非随机前瞻性临床试验中,用 DidRen 激光测试设备比较急性-亚急性颈痛患者与正常对照组的运动学差异,发现相比于对照组加速和减速峰值之间的时间增加。

颈椎运动平滑度和速度还可用于颈痛疗效评价。Tsang 等^[46] 在一项利用颈椎运动速度辅助预测慢性机械性颈痛人群的疼痛和功能恢复的实验中发现,术前颈椎后伸、前屈和右旋转速度在预测术后功能恢复方面能效较高。Hage 等^[42-45] 发现急性-亚急性非特异性颈部疼痛患者被动手法治疗后疼痛减轻,峰值速度、加速度增加,加速和减速峰值之间的时间减少。目前临床针对颈椎病治疗疗效评估的方法有颈椎活动度、VAS 评分、ODI、颈椎曲度等^[47-48],但颈椎运动速度在颈椎病治疗后疗效评价中的可行性却少有研究,在以上运动速度对颈痛疗效评价的研究基础上,可以进一步研究运动速度在各种类型颈椎病疗效评估中的适用性。

5 总结与展望

颈椎运动范围、运动曲线、速度和平滑度不管是在急性-亚急性、慢性非特异性颈痛疾病中,还是在各类颈椎病中,均与正常健康组有差别。光学运动捕捉系统在运动范围、运动曲线和速度的测量中广泛应用,惯性分析系统和动态分析系统最近也被用于测量运动范围。运动范围在最近的研究中也被用来预测术后颈椎曲度的变化,较大的运动范围更容易导致曲度异常,并且前后纵韧带的钙化也影响着运动范围的大小。椎间运动质量参数研究主要有双平面透视、尸体实验和有限元分析等方法,其对于提示颈椎退变有着很好的效果,临床中也多用来评估颈椎手术后运动模式的变化,其对于人工椎间盘的设计也有一定的指导效果,并且发现颈椎椎间运动质量参数和运动范围存在一定的相关性。但对于不同颈椎椎间运动质量参数指标的运动模式变化是否相同,以及颈椎椎间运动质量参数和运动范围变化的具体关系仍需要进一步研究。目前对于颈椎运动曲线的研究较少,颈椎曲线的不规则提示疼

痛或损伤的方向,较颈椎活动度更为全面,但其本身也随着颈椎活动度的改变而改变。运动速度在颈痛的疗效评估上显示出很好的作用,并且未来有望用于各类型颈椎病的疗效评估。

参考文献

- [1] SUKARI A A, SINGH S, BOHARI M H, et al. Examining the range of motion of the cervical spine: utilising different bedside instruments[J]. *Malays J Med Sci*, 2021, 28(2):100-105.
- [2] 高照,祝小波,寇晓洁.基于九轴惯性传感器的人体关节活动度测量方法研究[J]. *医疗卫生装备*, 2022, 43(7):14-22.
- [3] CHALIMOURDAS A, DIMITRIADIS Z, KAPRELI E, et al. Test-re-test reliability and concurrent validity of cervical active range of motion in young asymptomatic adults using a new inertial measurement unit device[J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2021, 18(10):1029-1037.
- [4] LI R, JIANG Q. A photogrammetric method for the measurement of three-dimensional cervical range of motion[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2022, 26(2):685-695.
- [5] DU L B, WANG Y, WU J, et al. Head-cervical spine motion measurement in healthy population: comparison of CROM apparatus and "G-Plus" APP on iPhone[J]. *World Neurosurgery*, 2023, 173:e442-e451.
- [6] XU Z, ZHOU J, WANG J, et al. Analysis of time-space variations during dynamic cervical spine motion in cervical spondylosis myelopathy patients[J]. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*, 2022, 22(11):1857-1865.
- [7] LIU S, LAFAGE R, SMITH J S, et al. Impact of dynamic alignment, motion, and center of rotation on myelopathy grade and regional disability in cervical spondylotic myelopathy[J]. *Journal of Neurosurgery Spine*, 2015, 23(6):690-700.
- [8] 周捷,王建喜,肖强强,等.动态骨骼肌肉综合分析系统测量颈椎活动度的重复性和可靠性分析[J]. *颈腰痛杂志*, 2021, 42(6):790-794.
- [9] LEVASSEUR C M, WAWROSE R, PITCAIRN S, et al. Dynamic functional nucleus is a potential biomarker for structural degeneration in cervical spine discs[J]. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 2019, 37(4):965-971.
- [10] WANG H, ZHOU C, YU Y, et al. Quantifying the ranges of relative motions of the intervertebral discs and facet joints in the normal cervical spine[J]. *Journal of Biomechanics*, 2020, 112:110023.
- [11] ZHOU C C, WANG H M, WANG C, et al. Intervertebral range of motion characteristics of normal cervical spinal segments (C_0-T_1) during in vivo neck motions[J]. *Journal of Biomechanics*, 2020, 98:109418.
- [12] LINDENMANN S, TSAGKARIS C, FARSHAD M, et al. Kinematics of the cervical spine under healthy and degenerative conditions: a systematic review[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2022, 50(12):1705-1733.
- [13] WANG X, LINDSTROEM R, PLOCHARSKI M, et al. Cervical flexion and extension includes anti-directional cervical joint motion in healthy adults[J]. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*, 2018, 18(1):147-154.
- [14] ANDERSEN V, WANG X, DE ZEE M, et al. The global end-ranges of neck flexion and extension do not represent the maximum rotational ranges of the cervical intervertebral joints in healthy adults: an observational study[J]. *Chiropractic & Manual Therapies*, 2021, 29(1):18.
- [15] MACHINO M, NAKASHIMA H, ITO K, et al. Cervical disc degeneration is associated with a reduction in mobility: a cross-sectional study of 1 211 asymptomatic healthy subjects [J]. *Journal of Clinical Neuroscience: Official Journal of the Neurosurgical Society of Australasia*, 2022, 99:342-348.
- [16] 赵琦,王珑清,陈清,等.颈椎韧带骨化特点及其与颈椎活动度的定量关系[J]. *脊柱外科杂志*, 2023, 21(2):99-103.
- [17] ZHANG B, CHEN G, GAO X, et al. Potential link between ossification of nuchal ligament and the risk of cervical ossification of posterior longitudinal ligament: evidence and clinical implication from a meta-analysis of 8 429 participants[J]. *Orthopaedic Surgery*, 2021, 13(3):1055-1066.
- [18] KAHLAEE A H, GHAMKHAR L, NOURBAKHSH M R, et al. Strength and range of motion in the contralateral side to pain and pain-free regions in unilateral chronic nonspecific neck pain patients[J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2020, 99(2):133-141.
- [19] FUJISHIRO T, NAKANO A, YANO T, et al. Significance of flexion range of motion as a risk factor for kyphotic change after cervical laminoplasty[J]. *Journal of Clinical Neuroscience: Official Journal of the Neurosurgical Society of Australasia*, 2020, 76:100-106.
- [20] ONO K, MURATA S, MATSUSHITA M, et al. Cervical lordosis ratio as a novel predictor for the loss of cervical lordosis after laminoplasty[J]. *Neurospine*, 2021, 18(2):311-318.
- [21] FUJISHIRO T, HAYAMA S, OBO T, et al. Gap between flexion and extension ranges of motion: a novel indicator to predict the loss of cervical lordosis after laminoplasty in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. *Journal of Neurosurgery Spine*, 2021, 35(1):8-17.
- [22] ZHAO S Z, QIAN B P, QIU Y, et al. Impact of cervical range of motion on the global spinal alignment in ankylosing spondylitis patients with thoracolumbar kyphosis following pedicle subtraction osteotomy[J]. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*, 2020, 20(2):241-250.
- [23] PAGAIMO F, FERNANDES P R, XAVIER J, et al. New methodology to assess in-vivo quality of motion in cervical spine[J]. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 2021, 82:105275.

- [24] JONAS R, DEMMELMAIER R, HACKER S P, et al. Comparison of three-dimensional helical axes of the cervical spine between in vitro and in vivo testing [J]. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*, 2018, 18(3): 515-524.
- [25] GUO Z, CUI W, SANG D C, et al. Clinical relevance of cervical kinematic quality parameters in planar movement [J]. *Orthopaedic Surgery*, 2019, 11(2): 167-175.
- [26] HAVEY R M, KHAYATZADEH S, VORONOV L I, et al. Motion response of a polycrystalline diamond adaptive axis of rotation cervical total disc arthroplasty [J]. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 2019, 62: 34-41.
- [27] YU Y, LI J S, GUO T, et al. Normal intervertebral segment rotation of the subaxial cervical spine: an in vivo study of dynamic neck motions [J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2019, 18: 32-39.
- [28] KIM S H, HAM D W, LEE J I, et al. Locating the instant center of rotation in the subaxial cervical spine with biplanar fluoroscopy during in vivo dynamic flexion-extension [J]. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 2019, 11(4): 482-489.
- [29] SANG D, CUI W, GUO Z, et al. The differences among kinematic parameters for evaluating the quality of intervertebral motion of the cervical spine in clinical and experimental studies: concepts, research and measurement techniques. A literature review [J]. *World Neurosurgery*, 2020, 133: 343-357.
- [30] AMEVO B, APRILL C, BOGDUK N. Abnormal instantaneous axes of rotation in patients with neck pain [J]. *Spine*, 1992, 17(7): 748-756.
- [31] ALSULTAN F, CESCOON C, DE NUNZIO A M, et al. Variability of the helical axis during active cervical movements in people with chronic neck pain [J]. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 2019, 62: 50-57.
- [32] SANG D, DU C F, WU B, et al. The effect of cervical intervertebral disc degeneration on the motion path of instantaneous center of rotation at degenerated and adjacent segments: a finite element analysis [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2021, 134: 104426.
- [33] LEE J H, LEE J H. The feasibility of optimal surgical result prediction according to the center of rotation shift after multilevel cervical total disc replacement [J]. *Asian Spine Journal*, 2020, 14(4): 445-452.
- [34] LI C, YU X, XIONG Y, et al. Mid-long-term follow-up of operated level kinematics after single-level artificial cervical disc replacement with Bryan disc [J]. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 2022, 17(1): 149.
- [35] YAN K, SHI Z, HE D, et al. Influence of the deviated center of rotation on the range of motion after cervical disc arthroplasty: an in vivo study with a minimum of 10-year follow-up [J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2023, 24(1): 88.
- [36] SANG H, CUI W, SANG D, et al. How center of rotation changes and what affects these after cervical arthroplasty: a systematic review and meta-analysis [J]. *World Neurosurgery*, 2020, 135: e702-e709.
- [37] YANG C C, SU F C, GUO L Y. A new concept for quantifying the complicated kinematics of the cervical spine and its application in evaluating the impairment of clients with mechanical neck disorders [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2012, 12(12): 17463-17475.
- [38] 徐善达, 孔令军, 朱清广, 等. 颈型颈椎病“筋骨失衡”的运动学特性研究 [J]. *中华中医药杂志*, 2020, 35(9): 4739-4742.
- [39] SALEHI R, RASOULI O, SAADAT M, et al. Cervical movement kinematic analysis in patients with chronic neck pain: a comparative study with healthy subjects [J]. *Musculoskeletal Science & Practice*, 2021, 53: 102377.
- [40] SARIG BAHAT H, CHEN X, REZNIK D, et al. Interactive cervical motion kinematics: sensitivity, specificity and clinically significant values for identifying kinematic impairments in patients with chronic neck pain [J]. *Manual Therapy*, 2015, 20(2): 295-302.
- [41] SARIG BAHAT H, WEISS P L T, SPRECHER E, et al. Do neck kinematics correlate with pain intensity, neck disability or with fear of motion? [J]. *Manual Therapy*, 2014, 19(3): 252-258.
- [42] HAGE R, DIERICK F, ROUSSEL N, et al. Age-related kinematic performance should be considered during fast head-neck rotation target task in individuals aged from 8 to 85 years old [J]. *Peer J*, 2019, 7: e7095.
- [43] HAGE R, BUISSERET F, PITANCE L, et al. Head-neck rotational movements using DidRen laser test indicate children and seniors' lower performance [J]. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0219515.
- [44] HAGE R, BUISSERET F, HOUY M, et al. Head pitch angular velocity discriminates (Sub-) acute neck pain patients and controls assessed with the DidRen laser test [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(7): 2805.
- [45] HAGE R, DETREMBLEUR C, DIERICK F, et al. Sensorimotor performance in acute-subacute non-specific neck pain: a non-randomized prospective clinical trial with intervention [J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2021, 22(1): 1017.
- [46] TSANG S M H, SZETO G P Y, SO B C L, et al. Using cervical movement velocity to assist the prediction of pain and functional recovery for people with chronic mechanical neck pain [J]. *Clinical Biomechanics*, 2022, 93: 105607.
- [47] 黄家瑶, 徐子军, 沈嘉程, 等. 自然位 X 线片对颈椎保守治疗前后生理曲度疗效的评估价值 [J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2020, 26(4): 370-374.
- [48] 曹胜, 孔令伟, 徐昆, 等. 颈椎矢状面序列参数对脊髓型颈椎病患者疼痛、颈椎功能及临床疗效的评估价值 [J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26(3): 419-424.

(收稿日期: 2023-05-14)