

文章编号:1004-7220(2020)05-0511-06

腰椎旋转中心的研究进展及联合评估

朱紫薇^{1,2}, 廖振华³, 刘伟强^{1,3}

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;
3. 深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057)

摘要:近年来,随着社会发展增速,腰椎疾病的发病率逐年升高,其手术方式繁多,这种杂而多的治疗方式标志着手术经验的积累和医疗技术的发展,但同时又引发了新的问题——如何对腰椎疾病及其术后康复的程度进行评估,医生与患者对建立腰椎疾病术前检查及术后康复标准的量化指标有了迫切需求。现有研究表明,腰椎旋转中心(center of rotation, COR)的测定和人体表面肌电(surface electromyography, sEMG)检查在腰椎疾病治疗中能够在评价临床疗效时减少误差,应用价值较高。综述腰椎 COR 与腰椎病症的关系、腰椎 COR 及其 sEMG 联合指标对临床手术及术后康复的评估作用。

关键词:旋转中心; 表面肌电; 腰椎疾病

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.05.019

Research Progress and Joint Evaluation on Center of Rotation for Lumbar Vertebrae

ZHU Ziwei^{1,2}, LIAO Zhenhua³, LIU Weiqiang^{1,3}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

Abstract: In recent years, with the growth of social development, the incidence of lumbar vertebrae diseases has increased year by year, and many surgical methods have been developed. These treatment methods mark the accumulation of surgical experience and the development of medical technology. However, a new issue appears, i.e. how to evaluate the degree of lumbar disease and postoperative rehabilitation. There is an urgent need to establish a quantitative index of preoperative examination and postoperative rehabilitation criteria for lumbar disease from both doctors' and patients' perspectives. The current studies show that the measurement of the center of rotation (COR) for lumbar vertebrae and surface electromyography (sEMG) can reduce the error in the evaluation of clinical curative effect for treating lumbar disease and can be applied widely. This review summarizes the relationship between COR and lumbar disease, as well as the role of COR and sEMG joint evaluation in clinical operation and postoperative rehabilitation.

Key words: center of rotation (COR); surface electromyography (sEMG); lumbar disease

收稿日期:2019-09-04; 修回日期:2019-12-28

基金项目:深圳市科技创新委员会应用示范项目(KJYY20170405161248988)

通信作者:刘伟强,教授,博士生导师,E-mail:weiqliu@hotmail.com

腰椎病是一种临床上常见的多发病,易发于中老年人。腰椎疾病病因复杂,临床症状轻重不一。临床将腰椎间盘突出、椎体滑脱、椎管狭窄、腰椎骨质增生、骨质疏松、骨折、骨瘤、腰椎结核等原因引起的腰椎病变,统称为腰椎疾病。冀文妮等^[1]针对广东中山市某医院骨科2010~2014年住院患者疾病谱变的统计显示,骨科住院患者中占据首位的病种为椎间盘疾患。国外研究发现,30岁以上人群有将近80%遇到过背部疼痛问题,其中85%人群患有非特异性下腰痛(nonspecial low back pain, NSLBP)^[2]。

腰椎疾病的评估方法通常分为定性和定量评估两大类^[3],前者主要以问卷调查的形式展开,后者主要以影像学表征为主。现有研究认为,定性评估方法虽然可以在一定程度上反映患者的真实情况,但问卷调查的方式主观性过强,测试结果受外界干扰大,可重复性低。在定量评估系统中,影像学表征只能获取静止状态下腰椎情况,无法了解运动下腰椎相对位置,无法实现对运动中滑脱等症状的评估。因此,动态的诊断方法会是未来的一个发展趋势。临床上采用过伸过屈位X光片测量来诊断脊柱不稳,提出利用椎体间的相对位置作为腰椎不稳的诊断标准^[4]。但实际临床中该判断方法阳性率太低,无法给出有说服力的诊断结果,推测原因是只关注过伸、过屈两个极限位置,中间变化情况被忽视,即只了解运动的数量,却未得到运动的质量^[5]。为探究运动质量,学者们开始关注腰椎旋转中心(center of rotation, COR)的测定和表面肌电检查^[6-8],以此作为评价腰椎间盘突出症临床疗效的客观量化指标。

1 腰椎 COR

1.1 概念

COR的概念是广义的。在机械学科中,有瞬时回转中心、瞬心、速度瞬心等概念;在生物力学中,有COR、平均旋转中心(mean center of rotation, MCR)、瞬时旋转中心(instant center of rotation, ICR)、瞬时旋转轴(instant axis of rotation, IAR)等概念。

从物理意义上来讲,刚体进行平面运动的任一瞬时,其速度为零的点称为速度瞬心。根据速度瞬

心的定义,可以通过寻找刚体上任意两点速度垂线的相交点确立速度瞬心,相交点即为瞬心^[9]。

脊柱旋转中心是有生物学基础的^[10]。在脊柱生物力学研究中,由于椎体的自身形变较小,故将椎体的运动视为刚体运动。联系物理学瞬心意,当椎骨从位置1移动到位置2时,椎骨上任意两点在1、2位置连线的垂直平分线产生交点,其交点位置即为椎骨COR。Taghipour-Darzi等^[11]的研究就采用此种COR确定方式。目前,关于椎体COR位置尚无统一认识,多数研究认为COR位置在椎体中心到椎体中后1/3处。

在脊柱COR的相关研究中,研究者在MCR基础上定义了ICR^[12]。由于椎体运动呈现为平移和旋转的复合运动,椎体COR始终在改变,故由此引入了ICR的概念。

1.2 腰椎 COR 测量方法

腰椎COR测量分为离体和在体测量两大类。

离体测量多选取尸体腰椎标本进行研究,目前已有研究者对离体脊柱的生物力学测试进行系统整理。戴力扬等^[13]采取尸体腰椎作为实验对象,对其拍摄屈伸侧位X线平片,但该研究认为对腰椎不稳的X线诊断建立标准还有一定困难。Zuhlke等^[14]将尸体标本固定在刚性旋转装置中,将其放置于CT扫描仪内,在脊柱沿每个方向旋转后扫描成像,数据输入计算机通过软件分析得出各平面的旋转活动度,然而这种二维方法不能反映脊柱的三维活动。Sengupta等^[15]选取10具尸体标本,采用X线和CT扫描的方式进行识别点位置标记,对腰椎标本进行6个自由度上的连续运动,最终通过计算机得到旋转轴的改变量;该研究公布了关于腰椎节段L4~5瞬时旋转轴在连续偏移情况下的数据,并认为该方法准确、精确,但不适用于在体脊柱的测量。

在体测量方面,研究人员利用X线、CT等技术手段进行腰椎模态分析。夏群^[16]招募10名志愿者,将双X线透视成像系统(dual fluoroscopic imaging system, DFIS)和MRI检查技术结合,对受试者进行数据采集,通过计算机软件辅助建立下腰椎椎体间三维运动状态,计算出L2~3、L4~5椎体节段间矢状面屈伸运动的COR位于椎体中后1/3处。Bible等^[17]采取体表标记的测量方式,利用电

子测角仪获得健康人群在 15 种日常活动中的腰椎活动度。Aiyangar 等^[18]对腰椎 COR 进行在体研究,将 X 线平片与 CT 技术结合,选取 14 个成年健康人(其中男性 8 人,女性 6 人)作为实验对象,测量时使用动态立体 X 射线系统(dynamic stereo-X-ray, DSX)对受试者的腰部区域进行成像,同时采用高分辨率 CT 获得受试者腰部信息。该技术能够提高生物力学模型的准确性,但仍然不能避免 X 线及 CT 拍摄产生的大量辐射。

1.3 腰椎 COR 与腰椎运动质量的联系

研究表明,腰椎不稳会影响腰椎运动的质量,故本文以腰椎不稳这种代表性腰椎疾病为例,说明腰椎疾病与 COR 的关系。目前研究通过在体和离体两种实验方法都获得了 COR 可以区分健康腰椎和腰椎节段不稳患者的结论^[19-20]。研究表明,患有腰椎节段性不稳定(lumbar segment instability, LSI)患者在进行屈伸和伸展运动时,其 COR 在 L5~S1 节段表现出的路径弧长明显高于健康对照组^[19]。Taghipour-Darzi 等^[11]研究表明,采用 ANOVA 分析数据时,LSI、NSLBP 及健康人腰椎 L4、L5 节段 COR 在 Y 轴方向上差异明显;采用 Tukey 统计学方法时,LSI 腰椎节段 L4 的 COR 在 Y 轴方向上与其他两组数据有明显差异。Anderst 等^[21]研究认为,COR 影响运动的质量,且与腰椎疾病联系紧密。戴力扬等^[13]研究认为,椎间盘退变后,瞬时旋转轴随之改变,并且受 ICR 后移的改变影响,患者的腰椎退变过程加剧。

1.4 腰椎脊柱 COR 的研究应用

在脊柱运动学中,腰椎脊柱 COR 是计算腰椎节段运动学特点的重要参数^[7,22]。研究者对于个体椎体的临床诊断提出了定量评估的必要性,COR 可以为医生和患者提供临床评估、康复评估等支持。

Sengupta 等^[23]通过对尸体腰椎的生物力学研究,发现运动范围(range of motion, ROM)、中立区(neutral zone, NZ)运动、IAR 等数据与椎间盘退变程度有关,IAR 平移量的增加表明运动质量异常。该研究虽然围绕机械不稳定性展开,无法确定临床不稳定性,但提供了临床上关于瞬时旋转轴与椎间盘退变程度关系的研究方向。Challis^[24]则提出有限旋转中心(finite center of rotation, FCR)的概念,表示 COR 作为人体运动学的变量可以很好评估关

节功能,并且对比不同程序评估 FCR 的准确性。Ahmadi 等^[19]分析连续旋转中心在屈伸运动中的轨迹,并用其评估健康人和腰痛患者脊柱运动质量的差异性。结果显示,腰痛患者在整个过程中旋转中心的轨迹总长度与健康人群相比显著增加。因此,腰椎脊柱 COR 逐步成为评价脊柱运动质量的重要参数。

同时,腰椎脊柱 COR 在人工椎间盘置换术中起到十分重要的作用^[25-26]。卓祥龙等^[27]对 17 例接受椎间盘置换术的外科手术治疗腰椎退变性椎间盘病(degenerative disc disease, DDD)患者进行长期随访,认为腰椎间盘置换术治疗 DDD 患者的长期临床效果表现优异,并且可以使邻近节段椎间盘退行性疾病的发病率降低,预防小关节退变。Han 等^[28]研究发现,不同假体位置导致的 COR 偏移会对躯干肌肉力产生相当大的影响。

1.5 腰椎 COR 研究脉络图

根据上述关于腰椎 COR 的调研与论述,绘制腰椎 COR 的研究脉络图(见图 1)。

2 腰椎 COR 及表面肌电联合检测的应用

2.1 表面肌电检测的应用

2.1.1 表面肌电技术简介 肌电(electromyography, EMG)信号是一种肌肉收缩时运动单元动作电位序列在时空叠加产生的生物电信号^[29]。表面肌电(surface electromyography, sEMG)技术是将电极贴在肌肉皮肤表面以收集整块肌肉的肌电活动,被广泛用于医学临床研究、康复工程等领域^[30-31]。

长期的腰椎疾病会使腰部肌肉有一定程度上的异常。研究表明,健康人和腰椎间盘突出症患者在屈伸运动时,其 sEMG 有明显差异,96% 健康人群有屈曲松弛现象,而腰椎间盘突出症患者中有屈曲松弛现象人群仅占 5%^[32]。研究人员通过对下腰痛患者腰部肌肉 sEMG 分析,得出下腰痛与腰部肌肉失衡有关的结论^[33]。因此,对腰部肌肉功能状态具有较高敏感性反映的 EMG 对于临床诊断的定量评估具有一定支撑作用^[30]。

2.1.2 sEMG 技术的应用 早期 EMG 检测多采用针电极插入肌肉的检测方式,这种方法定位准确、干扰小,但作为介入性检测,其有创性的特点导致实用价值受限。近年来广泛应用的 sEMG 是一种实

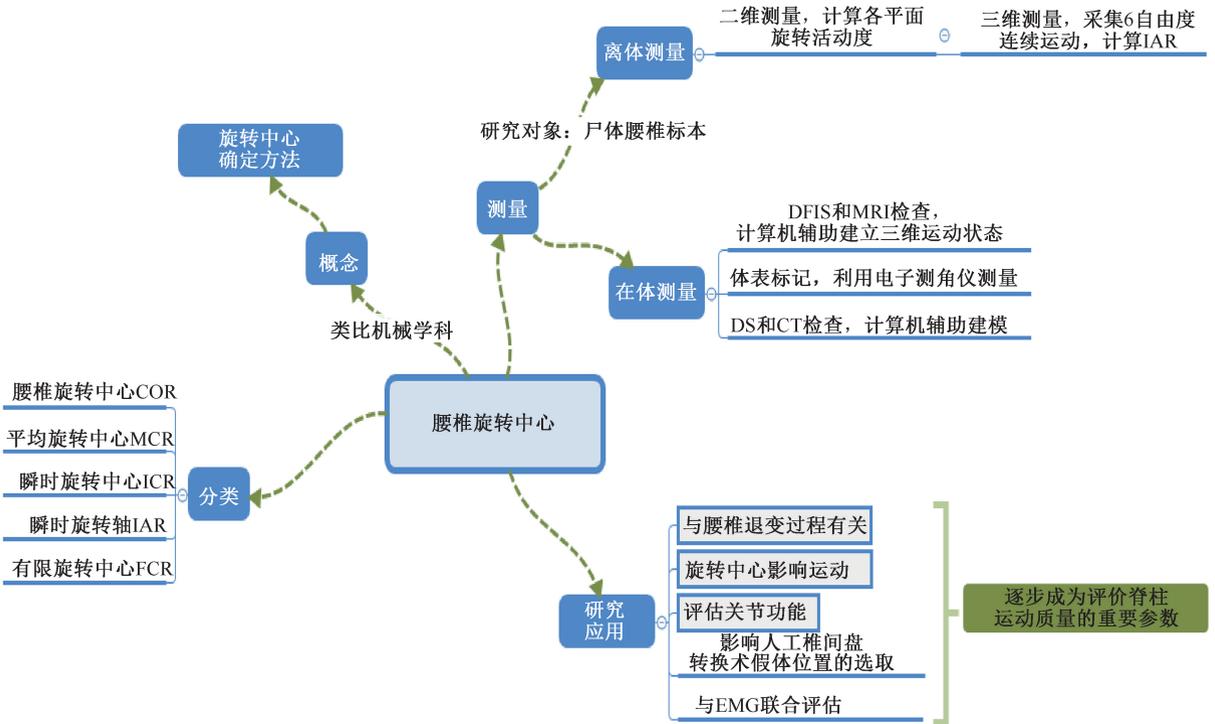


图1 腰椎旋转中心研究脉络

Fig.1 Study on center of rotation for lumbar vertebrae

时测量方法,可以用多种信号处理方法对数据进行处理分析,在监测对象肌肉活动的整体功能时无创伤、无痛感^[34]。

在下腰痛检测方面,研究显示下腰痛患者中存在屈曲放松现象缺失^[35]。屈曲放松是指躯干完全屈曲时腰椎旁肌电活动呈现静止的一种现象,而这种现象正是 sEMG 活动研究中最常使用的一个检测类别。Silfies 等^[33]通过对比下腰痛患者和健康人躯干肌 EMG,发现下腰痛患者腹外斜肌和腹直肌 EMG 活动较高,而其协同肌则较低。

sEMG 技术除了可以作为检测腰椎疾病的手段,也可以联合生物反馈作为一种治疗方法——表面肌电生物反馈(surface electromyographic biofeedback, sEMGBF)技术,它是指受试者通过 EMG 的反馈操纵自身肌肉活动,从而达到肌肉放松或增强的治疗目的^[36]。Flor 等^[37]研究表明,采用 sEMGBF 技术指导的训练效果明显优于无生物反馈的行为放松训练及常规干预方法。另有研究发现,存在屈曲放松现象缺失的下腰痛患者在经过完整的

sMEGBF 训练干预后得到明显改善。

2.2 腰椎 COR 及 sEMG 的联合评估应用

腰椎 COR 和 sEMG 作为两种评估腰椎活动的指标,肌肉活动与 COR 的改变有明显联系,有研究提出将两种指标联合应用。Zander 等^[38]研究表明, COR 向前侧偏移,腰部肌肉活动度增加。Han 等^[39]研究发现, COR 向后侧偏移仅 5 mm 就可以引起竖脊肌的肌肉力下降 28%。由于假体放置位置差异导致的 COR 偏移会严重影响躯干肌肉力。

3 结论

研究表明,腰椎 COR 在腰椎动态评估及腰椎运动质量评价等临床领域有着重要作用,目前的研究及应用充分肯定了腰椎 COR 作为客观指标在临床中的应用价值。同时,将腰椎 COR 及 EMG 联合作为联合指标也能够一定程度上从多角度对腰椎动态情况进行客观评价。这样的联合或许会在未来腰椎脊柱健康研究中有大的应用,可能会成为腰椎脊柱康复的一个研究方向。

参考文献:

- [1] 冀文妮, 苏韶生. 中山市某医院骨科 2010~2014 年住院患者疾病谱变迁及护理对策分析 [J]. 齐鲁护理杂志, 2015, 21(24): 62-64.
- [2] PETERSEN T, OLSEN S, LASLETT M, et al. Inter-tester reliability of a new diagnostic classification system for patients with non-specific low back pain [J]. Aust J Physiother, 2004, 50(2): 85-94.
- [3] 蒯声政, 周文钰, 廖振华, 等. 腰椎疾病的定性和定量评估方法 [J]. 中国康复医学杂志, 2014, 29(7): 685-689.
- [4] LEONE A, GUGLIELMI G, CASSAR-PULLICINO VN, et al. Lumbar intervertebral instability: A review [J]. Radiology, 2007, 245(1): 62-77.
- [5] ANDERST W, BAILLARGEON E, DONALDSON W, et al. Motion path of the instant center of rotation in the cervical spine during *in vivo* dynamic flexion-extension: Implications for artificial disc design and evaluation of motion quality after arthrodesis [J]. Spine, 2013, 38(10): E594-601.
- [6] ROUSSEAU MA, BRADFORD DS, BERTAGNOLI R, et al. Disc arthroplasty design influences intervertebral kinematics and facet forces [J]. Spine, 2006, 31(3): 258-266.
- [7] XIA Q, WANG SB, KOZANEK M, et al. *In-vivo* motion characteristics of lumbar vertebrae in sagittal and transverse planes [J]. J Biomech, 2010, 43(10): 1905-1909.
- [8] PARK K. Assessment of movement distribution in the lumbar spine using the instantaneous axis of rotation [J]. J Mech Sci Technol, 2014, 28(12): 5063-5067.
- [9] 詹琼. 平面运动刚体瞬心的分析及应用 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2009, 26(1): 17-20.
- [10] YAN W, ZHAO G, FANG X, et al. Construction and analysis of a finite element model of human L4-5 lumbar segment [J]. J Biomed Eng, 2014, 31(3): 612-618.
- [11] TAGHIPOUR-DARZI M, EBRAHIMI-TAKAMJANI E, SALAVATI M, et al. Construct validity of center of rotation in differentiating of lumbar segmental instability patients [J]. J Back Musculoskelet, 2015, 28(4): 675-680.
- [12] AMEVO B, WORTH D, BOGDUK N. Instantaneous axes of rotation of the typical cervical motion segments: A study in normal volunteers [J]. Clin Biomech, 1991, 6(2): 111-117.
- [13] 戴力扬, 徐印坎, 张文明, 等. 瞬时旋转中心与腰椎不稳 [J]. 骨与关节损伤杂志, 1990, 5(1): 24-26.
- [14] ZUHLKE T, FINE J, HAUGHTON VM, et al. Accuracy of dynamic computed tomography to calculate rotation occurring at lumbar spinal motion segments [J]. Spine, 2009, 34(6): E215-E218.
- [15] SENGUPTA DK, DEMETROPOULOS CK, HERKOWITZ HN. Instant axis of rotation of L4-5 motion segment: A biomechanical study on cadaver lumbar spine [J]. J Indian Med Assoc, 2011, 109(6): 389-395.
- [16] 夏群. 腰椎椎体间旋转中心的在体研究 [J]. 中华骨科杂志, 2010, 30(4): 325-329.
- [17] BIBLE JE, BISWAS D, MILLER CP, et al. Normal functional range of motion of the lumbar spine during 15 activities of daily living [J]. J Spinal Disord Tech, 2010, 23(2): 106-112.
- [18] AIYANGAR AK, ZHENG LY, TASHMAN S, et al. Capturing three-dimensional *in vivo* lumbar intervertebral joint kinematics using dynamic stereo-X-ray imaging [J]. J Biomech Eng, 2014, 136(1): 011004.
- [19] AHMADI A, MAROUFI N, BEHTASH H, et al. Kinematic analysis of dynamic lumbar motion in patients with lumbar segmental instability using digital videofluoroscopy [J]. Euro Spine J, 2009, 18(11): 1677-1685.
- [20] GERTZBEIN SD, SELIGMAN J, HOLTBY R, et al. Centroid characteristics of the lumbar spine as a function of segmental instability [J]. Clin Orthop Relat Res, 1986, 208: 48-51.
- [21] ANDERST W, BAILLARGEON E, DONALDSON W, et al. Motion path of the instant center of rotation in the cervical spine during *in vivo* dynamic flexion-extension implications for artificial disc design and evaluation of motion quality after arthrodesis [J]. Spine, 2013, 38(10): E594-E601.
- [22] HAUGHTON VM, ROGERS B, MEYERAND ME, et al. Measuring the axial rotation of lumbar vertebrae *in vivo* with MR imaging [J]. Am J Neuroradiol, 2002, 23(7): 1110-1116.
- [23] SENGUPTA DK, FAN HB. The basis of mechanical instability in degenerative disc disease: A cadaveric study of abnormal motion versus load distribution [J]. Spine, 2014, 39(13): 1032-1043.
- [24] CHALLIS JH. Estimation of the finite center of rotation in planar movements [J]. Med Eng Phys, 2001, 23(3): 227-233.
- [25] SENTELER M, AIYANGAR A, WEISSE B, et al. Sensitivity of intervertebral joint forces to center of rotation location and trends along its migration path [J]. J Biomech, 2018, 70: 140-148.
- [26] LIU Z, TSAI TY, WANG SB, et al. Sagittal plane rotation center of lower lumbar spine during a dynamic weight-lifting activity [J]. J Biomech, 2016, 49(3): 371-375.
- [27] 卓祥龙, 胡建中, 王文军, 等. 人工腰椎间盘 (Charité III) 置换治疗腰椎间盘病长期疗效 [J]. 中国矫形外科杂志, 2017, 25(1): 5-9.
- [28] HAN KS, KIM K, PARK WM, et al. Effect of centers of

- rotation on spinal loads and muscle forces in total disk replacement of lumbar spine [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2013, 227(5): 543-550.
- [29] 成娟. 基于表面肌电和加速度信号融合的动作识别和人体行为分析研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [30] CIFREK M, MEDVED V, TONKOVIĆ S, *et al.* Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics [J]. Clin Biomech, 2009, 24(4): 327-340.
- [31] EKSTROM RA, OSBORN RW, HAUER PL. Surface electromyographic analysis of the low back muscles during rehabilitation exercises [J]. J Orthop Sport Phys, 2008, 38(12): 736-745.
- [32] 卫杰. 表面肌电图与腰椎间盘突出症临床表现和疗效的相关性研究[D]. 北京: 中国中医科学院, 2007.
- [33] SILFIES SP, SQUILLANTE D, MAURER P, *et al.* Trunk muscle recruitment patterns in specific chronic low back pain populations [J]. Clin Biomech, 2005, 20(5): 465-473.
- [34] HÄGG GM. Interpretation of EMG spectral alterations and alteration indexes at sustained contraction [J]. J Appl Physiol, 1992, 73(4): 1211-1217.
- [35] AMBROZ C, SCOTT A, AMBROZ A, *et al.* Chronic low back pain assessment using surface electromyography [J]. J Occup Environ Med, 2000, 42(6): 660-669.
- [36] NEBLETT R. Surface electromyographic (SEMG) biofeedback for chronic low back pain [J]. Healthcare, 2016, 4(2): 27.
- [37] FLOR H, BIRBAUMER N. Comparison of the efficacy of electromyographic biofeedback, cognitive-behavioral therapy, and conservative medical interventions in the treatment of chronic musculoskeletal pain [J]. J Consult Clin Psychol, 1993, 61(4): 653-658.
- [38] ZANDER T, DREISCHARF M, SCHMIDT H. Sensitivity analysis of the position of the intervertebral centres of reaction in upright standing: A musculoskeletal model investigation of the lumbar spine [J]. Med Eng Phys, 2016, 38(3): 297-301.
- [39] HAN KS, KIM K, PARK WM, *et al.* Effect of centers of rotation on spinal loads and muscle forces in total disk replacement of lumbar spine [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2013, 227(5): 543-550.