

文章编号:1004-7220(2012)02-0159-07

基于影像学及计算机图像处理方法研究活体 腰椎小关节结构三维分布

段春岳^a, 吕红斌^b, 胡建中^a

(中南大学湘雅医院 a. 脊柱外科; b. 运动医学科,长沙 410008)

摘要:目的 基于小关节三维重建图像分析软骨下皮质骨厚度、小关节面面积及关节间隙宽度的三维分布情况,研究其结构特点及变化规律,并比较腰痛患者及健康人中这些参数的差别。**方法** 对90名研究对象分别行仰卧位CT扫描,获取L1~S1 5个节段小关节的二维图像,重建后分别获得软骨下皮质骨、小关节面及关节间隙的三维面点云图。研究上述参数在整个关节面上、以及关节面的不同区域的分布特点,比较它们在不同腰椎节段、性别、年龄及症状组中的差异。**结果** (1)软骨下皮质骨厚度方面,在上关节突,头端区最厚;在下关节突,尾端区最厚。中央区的厚度明显小于其他各区。各区之间的差别在低位节段腰椎中(L4/5, L5/S1)较明显。(2)小关节平均面积为 $(173.2 \pm 3.6) \text{ mm}^2$,且随腰椎节段及年龄的增加而增大,L4/5节段以下及40岁以上更加明显。腰痛患者上关节突关节面的面积明显较下关节突关节面的面积大(L5/S1节段除外)。腰痛患者的小关节面积明显大于健康人。(3)小关节间隙平均宽度为 $(1.46 \pm 0.08) \text{ mm}$,随年龄增加而变窄,40岁以上者更明显,女性均较男性宽,腰痛患者则显著变窄。分区比较时,关节面头侧关节间隙较尾侧间隙宽,中央区的间隙普遍较周围区宽,这些差别在腰痛患者及下3个节段中更明显。**结论** 计算机图像处理及重建分析技术可以较准确的测量三维空间内形状复杂的小关节的相关参数。小关节各结构在三维空间的分布具有一定特点,这些特点与关节面形态、关节间应力及关节退变等因素有关,反映了长期的负荷状态下人体结构的适应性改变。

关键词: 小关节; 图像处理; CT扫描; 重建; 皮质骨; 应力分布

中图分类号: R 318.01

文献标志码: A

In vivo study on three-dimensional structure of lumbar facet joints based on computer-assisted medical image processing method

DUAN Chun-yue^a, LU Hong-bin^b, HU Jian-zhong^a (a. Department of Spine Surgery; b. Department of Sports Medicine, Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410008, China)

Abstract: Objective To study three-dimensional feature of the thickness of subchondral cortical bone, the surface area and space width of the facet joints as well as its morphological characteristics and variation, and to compare the differences of these parameters in patients with low back pains and healthy people, based on three-dimensional reconstruction images of the facet joints. **Methods** CT scanning from L1/2 to L5/S1 at supine position was performed on 90 subjects to obtain two-dimensional images of the facet joints and three-dimensional point-cloud data of the subchondral cortical bone, the surface area and space width of the facet joints after reconstruction. Distributions of these parameters between the superior and inferior facet joints and at different regions of the articular process were investigated, and differences of these parameters in lumbar segments, gender, age and symptoms were also compared. **Results** (1) At superior facet, the largest thickness was located at the cranial region, while at inferior facet, it was located at the caudal region. The thickness of subchondral cortical bone was significantly smaller at central region than at the other regions. A more obvious difference could be observed

收稿日期:2012-03-01; 修回日期:2012-03-22

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2011QNZT16301003778)。

通讯作者:吕红斌, Tel: (0731) 89757059, E-mail: hongbinlu@hotmail.com。

at the lower lumbar levels (L4/5, L5/S1). (2) The average surface area of the facet joints was (173.2 ± 3.6) mm^2 , and it was increased with the lumbar level and age increasing, especially at the L4/5 level and at the age of more than 40. The surface area of superior facet joints was significantly larger than that of inferior facet joints for patients with low back pains (except at L5/S1 level), who had an obviously larger surface area of the facet joints than healthy people. (3) The average thickness of space width of the facet joints was (1.46 ± 0.08) mm, and it was decreased with age decreasing, especially at the age of more than 40. The female had significantly larger space width than the male, while patients with low back pains had significantly smaller space width. At each facet joint, the space at cranial region was significantly larger than that at caudal region, and it was also significantly larger at central region than at surrounding region. These differences were more obvious at the lower three lumbar levels. **Conclusions** Computer-assistant image processing and reconstruction analysis techniques can accurately measure the relative parameters of lumbar facet joints with complicated structure in three-dimensional space. The feature of the facet joints was correlated with shape of the facet joint surface, stress on the joint and degeneration of the joint, so it was a reflection of adaptive changes in human body structure due to the long-term loading on the facet joint.

Key words: Facet joint; Image processing; CT scans; Reconstruction; Cortical bone; Stress distribution

由于小关节体积微小、形态复杂以及位置隐蔽,常规方法难以对其进行全面观察。此前的研究大都在二维层面上进行,虽有部分研究描述了小关节相关结构在三维空间的分布及变化,但这些研究多在尸体标本上进行^[1-3]。近年来,随着分析方法、图形学和计算机技术等的发展,图像处理和分析技术已逐渐渗入到医学领域并日渐成熟与应用。基于影像学二维图像进行三维重建的技术成为国内外研究与应用的热点,受到越来越多的重视。三维空间能提供比二维平面更加丰富的信息、更逼真的显示效果,并可从多角度、多层次进行全面的观察和分析,在科学研究、辅助诊断、指导治疗等方面发挥极其重要的作用。因此,利用计算机进行医学图像的处理和分析具有重要意义。本研究采用CT密层扫描结合计算机图像处理技术,对活体小关节软骨下皮质骨厚度、小关节面面积、关节间隙宽度的三维分布情况进行分析,探讨其结构特征,研究其在腰痛患者中的变化。

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究对象90名,其中男性54名(腰痛患者31名,健康人23名),女性36名(腰痛患者15名,健康人21名),年龄22~58岁,平均年龄(37.6 ± 3.8)岁,体重68~169 kg,平均体重(75.4 ± 6.5)kg,身高155~183 cm,平均身高(168.6 ± 9.7)cm。其中腰痛患者46名,健康人44名。腰痛患者均无外

伤史、无脊柱及腰背部手术史、腰痛症状持续或间断发作3个月以上,经X线检查无椎体滑脱、脊柱畸形。实验获得伦理委员会批准。

1.2 CT扫描资料的获取

采用基于阈值分割及点云计算的图像处理及分析方法,对腰椎小关节进行研究。在前期工作中^[4],已初步验证了该方法的可靠性及准确性。

为确保参数统一,由同一CT扫描机扫描(Volume Zoom, 西门子),同一放射科医生进行操作。扫描参数:管电压120 kV,管电流250 mAs,扫描速度0.3 s/360°,准直器宽度1 mm,螺距0.9:1,层厚1.0 mm,间距0.5 mm。扫描时仰卧位,扫描范围为L1/2、L2/3、L3/4、L4/5、L5/S1 5个节段的小关节,扫描平面与检查床垂直。图像转换为DICOM(医疗数字影像传输协定图像)格式保存。

1.3 软骨下皮质骨厚度三维分布的研究

1.3.1 分割阈值的获取 将原始CT轴位图像导入图像处理程序(Microsoft Visual C++),选取并放大感兴趣区(range of interest, ROI)区,包括皮质骨和相邻部位的松质骨(见图1(a)、(b)),计算出ROI区域的灰度级直方图(见图1(c)),根据Keller^[5]公式得出最佳阈值 P_0 。

1.3.2 图像的二值化 原始CT图像上每个像素值与 P_0 值进行比较,灰度值小于 P_0 者分割为灰色,大于 P_0 者分割为白色(见图1(d))。原始CT灰度值图像转化为由灰色和白色构成的二值化图像。

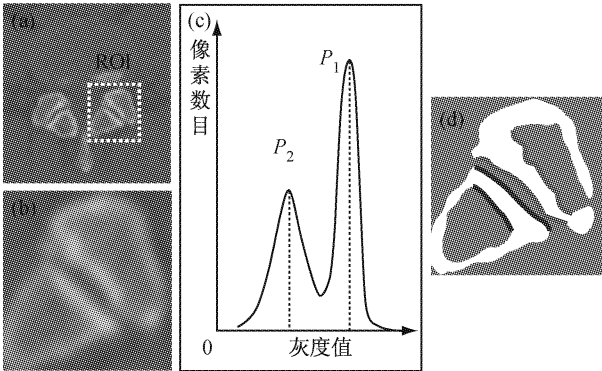


图1 图像的二值化处理过程 (a)原始CT图像(图中虚框部分为ROI区),(b)ROI放大;(c)ROI区灰度级直方图(其中 P_1 、 P_2 分别代表皮质骨和松质骨峰),(d)基于灰度级直方图得出 P_0 后对图像二值化(其中白色部分表示皮质骨)

Fig.1 Process of image binarization (a) Original CT images, (b) Magnified ROI, (c) Histogram of ROI gray level, (d) Binary images

1.3.3 边缘的提取 由于二值化后的软骨下皮质骨边缘与其周围像素灰度有阶跃变化,采用 Canny 检测法^[6]在图像中找出具有局部最大梯度幅值的像素点,并用 VC 程序实现边缘的自动提取。

1.3.4 点云的转化与修正 提取后的边缘曲线转化为一组由 15 ~ 20 个等距离的离散坐标点组成的“线点云”,将每层的“线点云”互相叠加,组成软骨下皮质骨两侧面的“面点云”,即每个面转换成由 300 ~ 500 个点组成的点集(见图 2 (a))。每个面又被分为面积相等的 5 个区(见图 2 (b)),分别为中央区与头侧、尾侧、腹侧、背侧缘区,以便分区进行比较。由于软骨下皮质骨相对面的边缘并不必然吻合,会造成结果偏差,需对面点云的边缘进行调整。主要分两种情况:①当一面的边缘超出了其相对面边缘时,会使计算结果偏大,需将超出部分的点去除。②在软骨下皮质骨的边缘,有时存在骨质增生形成的骨刺,骨赘等,亦会使结果增大,此部分也去除。

1.3.5 厚度的测量 采用点云间最小距离法,即计算软骨下皮质骨一面上每个点到相对面的所有点间距离,取最小者作为该点对应的软骨下皮质骨的厚度(见图 2 (c)),计算所有点对应的厚度的平均值作为软骨下皮质骨的平均厚度。再分别计算 5 个区域中各自对应的厚度。由于本研究选取 ROI 时一定的主观误差不可避免。为减少这种误差,在对

所有 90 例样本初次测量 15 d 后,由同一研究者再次进行测量,取两次测量的平均值作为最终结果。

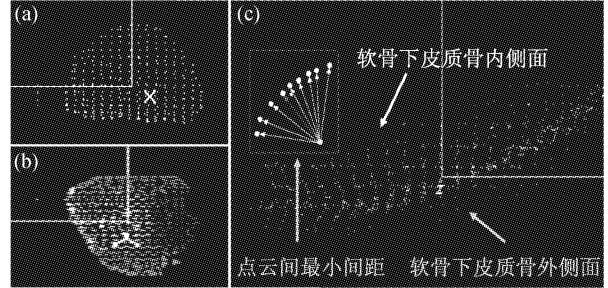


图2 小关节面点云数据 (a)“面点云”(将小关节面转换成 300 ~ 500 个点组成的点集),(b)每个“面点云”又被分为面积相等的 5 个区,分别为中央区与头侧、尾侧、腹侧、背侧缘区,(c)软骨下皮质骨关节面侧与松质骨侧面点云间采用最小间距法计算皮质骨的厚度

Fig.2 Point-cloud data of the facet joints (a) The facet joint surface was transformed into a set of 300 ~ 500 points, (b) Each point-cloud was divided into five regions with equal surface area, namely, the central region, the cranial region, the caudal region, the abdomen region and the lateral region, (c) Width of the cortical bone was calculated by the least distance between the two point-cloud datasets

1.4 小关节面积的三维测量

小关节面的面积定义为各关节突软骨下皮质骨的关节面缘的面积。计算时,以面点云上每个小三角面为基本单元,小关节面的面积即面点云构成的所有小三角面的面积之和。

1.5 小关节间隙宽度三维分布的研究

小关节间隙定义为上、下关节突软骨下皮质骨的关节面缘间的距离。采用点云间“最小间距”法进行计算,得到平均宽度后再分别计算 5 个区域各自对应的关节间隙宽度。

2 数据处理

结果均以均值±标准差表示,并按照脊柱节段、性别、症状及年龄段进行分组比较。根据不同组别,分别采用配对样本 t 检验,单因素方差分析(ANOVA)及 Fischer 检验。所有数据采用 SPSS 16.0 进行统计学分析, $P < 0.05$ 时有统计学意义。

3 结果

3.1 软骨下皮质骨厚度的分区比较

软骨下皮质骨厚度在每个节段的左右关节突的

相同区域间无显著差别。在上关节突的头端区与尾端区最厚($P < 0.01$),且头端区又较尾端区厚($P < 0.05$)。在下关节突,尾端区与头端区最厚($P < 0.05$)。中央区的厚度都明显小于其他各区($P < 0.05$,见表1)

3.2 小关节面的面积

所有研究对象小关节面的平均面积为(173.2 ± 3.6) mm^2 。腰痛患者中,下4个腰椎节段,上关节突关节面的面积明显较下关节突关节面的面积大($P < 0.05$);在L5/S1节段,L5下关节突面积明显超过S1上关节突。而在健康人中,仅L4/5节段的上关节突关节面面积较下关节突关节面面积大。小关节面的面积随腰椎节段的增加而增大,这种趋势在下关节突表现尤为明显。L4/5及L5/S1节段的小关节面面积分别较上3个节段明显增大($P < 0.01$)。小关节面积随年龄的增加而增大,40岁以上增大显著。在腰痛患者与健康人的比较中,可见30岁以上的研究对象中,腰痛患者的小关节面积明显大于健康人($P < 0.05$,见表2、图3)。

表2 腰椎小关节面积比较

Tab.2 Surface area of lumbar facet joints

(均值 \pm 标准差) mm^2

		L1/2	L2/3	L3/4	L4/5	L5/S1
腰痛者	上关节突	159.2 \pm 3.8	182.3 \pm 5.9*	193 \pm 2.6*	219 \pm 1.6*‡	233 \pm 4.7*‡
	下关节突	146.6 \pm 5.2	160.8 \pm 4.5	163.2 \pm 3.4	189.1 \pm 2.7‡	251 \pm 5.2‡
健康人	上关节突	148.8 \pm 4.4	165 \pm 3.1	179.3 \pm 6.6	208.8 \pm 4.9*‡	210 \pm 3.3‡
	下关节突	144.2 \pm 5.9	158.3 \pm 7.4	171.2 \pm 3.8	188 \pm 5.1‡	223.6 \pm 5.2‡

* $P < 0.05$,上下关节突之间的比较,‡ $P < 0.05$,与上位3个腰椎节段间的比较

表3 腰椎小关节间隙的宽度

Tab.3 Space width of lumbar facet joints

(均值 \pm 标准差) mm

	L1/2	L2/3	L3/4	L4/5	L5/S1
健康人	1.51 \pm 0.077‡	1.81 \pm 0.079‡	1.71 \pm 0.064‡	1.81 \pm 0.065‡	1.42 \pm 0.082‡
腰痛者	1.08 \pm 0.054	1.16 \pm 0.054	1.41 \pm 0.1	1.54 \pm 0.086	1.19 \pm 0.053
男性	1.37 \pm 0.054	1.60 \pm 0.054	1.66 \pm 0.1	1.72 \pm 0.086	1.39 \pm 0.1
女性	1.49 \pm 0.1*	1.75 \pm 0.054*	1.86 \pm 0.086*	1.93 \pm 0.054*	1.53 \pm 0.09*

* $P < 0.05$,男性与女性间的比较,‡ $P < 0.01$,健康人与腰痛者间的比较

3.3 小关节间隙的宽度

所有90名研究对象小关节间隙的平均值为(1.46 ± 0.08) mm。其中,健康人的小关节间隙为(1.65 ± 0.09) mm,腰痛患者的小关节间隙为(1.27 ± 0.06) mm。每个节段,女性关节间隙均较男性宽($P < 0.05$)。在每个年龄段,女性关节间隙亦较宽($P < 0.01$)。在每个节段,腰痛患者关节间隙均较健康人更窄($P < 0.01$)。健康人腰椎小关节间隙随年龄增加而减小,40岁以后减小明显(见表3、图4)。

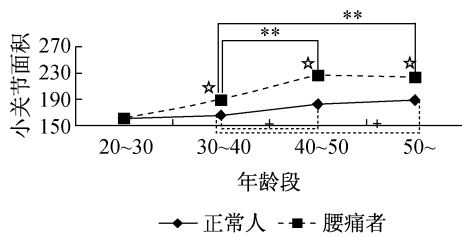
表1 软骨下皮质骨厚度的分区比较

Tab.1 Thickness of subchondral cortical bone

(均值 \pm 标准差) mm

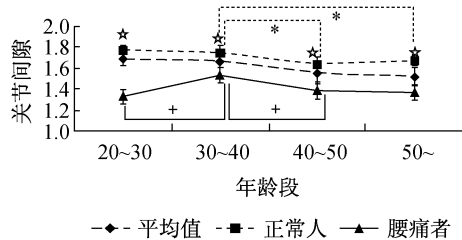
	上关节突	下关节突
头侧区	2.02 \pm 0.055*†	1.52 \pm 0.013
尾侧区	1.86 \pm 0.034*‡	1.61 \pm 0.026*
腹侧区	1.72 \pm 0.072‡	1.41 \pm 0.042
背侧区	1.71 \pm 0.01‡	1.46 \pm 0.051
中央区	1.58 \pm 0.033*‡	1.07 \pm 0.036*

* $P < 0.05$,与关节突其他区域的比较,† $P < 0.01$,‡ $P < 0.05$ 上下关节突间的比较



“**” $P < 0.01$, “+” $P < 0.05$ 年龄段间比较。☆ $P < 0.05$ 同年龄段健康人与腰痛患者间比较

图3 腰痛患者与健康人小关节面积随年龄变化的趋势
Fig.3 Variance of surface area of the facet joints with age for patients with low back pains and healthy people



“*” $P < 0.05$ 健康人; “+” $P < 0.05$ 腰痛者, 不同年龄段间比较。
“☆” $P < 0.05$ 健康人与腰痛患者间比较

图4 健康人与腰痛者小关节间隙随年龄变化的趋势
Fig.4 Variance of space width of the facet joints with age for patients with low back pains and healthy people

4 讨论

本文采用 CT 密层扫描结合计算机图像处理技术,对活体小关节软骨下皮质骨厚度、小关节面面积、关节间隙宽度的三维分布情况进行分析。腰椎小关节面积的改变是小关节骨关节炎的主要特点之一。然而目前关于小关节面积测量的报道较少^[1,7]。Panjabi 等^[1-2]首次对小关节面积做了近似的定量研究,他们将小关节面的横径与纵径投影于在平面上,测量其长度,然后分别以横、纵径作为长、宽值,将小关节面近似拟合为椭圆形,计算椭圆形的面积。虽然长度与宽度的测量是在三维空间中进行的,然而该研究将关节面近似处理为二维平面的椭圆,忽略了关节面在三维空间中的曲度变化对面积造成的影响。Tanno 等^[3]采用一种独特的方法对尸体小关节的面积进行了测量,用湿纸贴附于小关节面,并按小关节面的曲度进行塑型,然后沿关节面的边缘将纸裁下,展平后测量纸的面积作为小关节的

面积。这种方法解决了小关节曲度造成的关节面测量的难题,然而该方法受到操作的影像较大,而且只能用于尸体标本的测量,无法应用于活体。本研究以 1 mm 的层厚对小关节区域进行 CT 密扫,对扫描后的层面逐层叠加并三维重建,故获得的关节面的形态较准确;将小关节面转化为 300 ~ 500 个独立的点构成的点云数据,通过计算相邻 3 点构成的小三角面的面积并对全部小三角面面积进行总和得出小关节的面积。这种方法不受小关节面曲度的影像,且由于面点云数据中两点间的距离很小,其构成的小三角面的角度对结果影响不大,故结果较为精确。

本文发现,不论腰痛患者还是健康人,小关节的面积随腰椎节段的增加而增大。同时,小关节面积随年龄增高而增加,这种趋势在 40 岁以上人群及腰痛患者中更明显。腰痛患者小关节面积都较健康人大,且腰痛患者腰椎下 4 个节段的上关节突关节面面积显著大于下关节突关节面面积,而健康人只在 L4/5 节段存在这一差异。关节面的面积与关节的运动和稳定密切相关。根据力学分析,当上下关节面相匹配时,随关节面积的增大,其所承受的压力及运动时所受的应力减小,关节较稳定,不易损伤;如果上下关节面的面积不相匹配,则关节不稳定,容易造成损伤。腰痛患者的上关节面面积显著增大,故节段的稳定性较差。因此,上下关节不匹配、关节面积增大可能是小关节源性腰痛的特征性表现之一。

小关节间隙的狭窄也被认为是反映关节退变的重要特征之一。许多研究利用 CT 或 MRI 断层图像对小关节间隙的变化进行了研究^[8-10],然而目前关于小关节的三维结构仍不清楚。本研究发现,小关节间隙随年龄增加而减小,40 岁以后更明显,且在腰痛患者中更显著。与此相应,小关节的面积随年龄增加逐渐增大,且亦为 40 岁以后更明显。这种随年龄增加而发生的改变可能与小关节的骨关节炎有关。因此,年龄大于 40 岁可能是腰痛发生的危险因素之一,腰痛的原因可能是小关节退变或小关节骨关节炎所致。Taylor 等^[11]曾用组织学方法对不同年龄段的尸体腰椎小关节的形态进行观察,发现软骨及软骨下皮质骨的形态随年龄的增加而改变,40 岁左右开始明显,而 60 岁以后更加显著。Lewin 等^[12]发现关节软骨在 45 岁前变化不明显,45 岁以后出现普遍的骨质增生和软骨下骨的硬化,且变化

明显。Fujiwara 等^[13]通过 MRI 对腰痛患者的小关节退变程度的研究,发现 40 岁以下的患者中仅有少部分存在轻度的小关节骨关节炎,大于 60 岁的患者中小关节退变较明显,呈现不同程度的骨关节炎表现。

本文通过不同性别之间的对比发现,男性的小关节间隙均小于女性,且以 40 岁以后差别更显著。之前的多项研究也发现,性别因素与小关节骨关节炎的发生有关。Eubanks 等^[14]通过对尸体腰椎标本的研究,发现各个腰椎节段的小关节骨关节炎的发病率在男性均高于女性。Ha 等^[15]等通过免疫组化的方法对小关节的软骨进行研究,发现软骨上广泛存在雌激素受体,且雌激素受体的数量与小关节骨关节炎的严重程度成正比。激素水平在这种差异中起着关键作用^[16-18]。绝经前女性体内雌激素水平显著高于男性,软骨发育较好,小关节骨关节炎的发生率明显低于男性;绝经后由于女性雌激素水平下降,使小关节软骨破坏加快加重,骨关节炎的发生率较绝经前明显升高。然而也有学者发现性别与骨关节炎之间不存在相关性。

分区比较结果显示,小关节间隙在关节面的头侧缘明显大于尾侧缘,外侧缘明显大于内侧缘,中央区明显大于周围区,这也间接反应了小关节软骨厚度的分布情况。Takatori 等^[19]通过 CT 吸光光度法对小关节软骨下骨的密度进行了研究,表明小关节的中央区及外侧区软骨下骨密度较高,软骨下骨密度反映长期以来关节负荷的分布,密度越高的部位说明该处所受到的作用力越大^[20];结合本研究中小关节间隙的分布特点,可以推知小关节的尾侧缘及外周区可能是骨关节炎的起始部位或受累较严重的部位。

本文还发现,大多数参数的变化趋势在 L4/5 节段达到高峰,而到 L5/S1 节段时却发生逆转。例如,小关节间隙的宽度虽然随腰椎节段的增加而增宽,但是 L5/S1 节段却较头侧节段明显变窄。头侧 4 个节段中上关节突的面积都较下关节突大,而 L5/S1 节段却相反,下关节突面积大于上关节突。之前的研究也发现过这一改变。Eubanks 等^[14]发现腰椎各个节段中, L1/2 ~ L5/S1 小关节骨关节炎在头侧 4 个节段发病率逐渐增高, L5/S1 发病率却降低。Fujiwara 等^[13]也表明,从 L3/4 到 L5/S1,小关节骨关

节炎的发病率呈现先升高后降低的情况, L4/5 节段的发病率最高。目前对于 L4/5 到 L5/S1 节段规律的改变仍缺乏可信的解释及相关的研究,本文认为这种现象发生的原因与腰椎的生物力学特点密切相关。苏再发等^[21]研究显示,在腰椎各个节段中, L4/5 节段的所承受的负荷较大,且腰椎活动度方面 L4/5 亦较 L5/S1 大,所以骨性关节炎的发病率在 L4/5 节段最高。张国川等^[22]研究也表明,在脊柱轴向压缩时,腰椎尾侧节段中应力主要分布于小关节而非椎间盘,其中 L4/5 节段承受应力最大,而 L5/S1 节段由于小关节面形态平直、关节突关节角大、关节面面积大及关节间隙小的特点,其主要作用为引导腰椎运动及保持腰椎稳定。

5 结论

本文所采用的基于点云数据的测量方法可以较准确地测量三维空间内形状复杂的小关节结构。腰椎小关节面积、关节间隙的宽度、软骨下皮质骨的厚度的三维分布各具特点,腰痛患者小关节间隙狭窄,关节面积增大,上关节面面积显著大于下关节面,以上变化在年龄超过 40 岁、男性及绝经后女性、L4/5 节段、关节面不匹配时更明显。研究这些差异有助于理解小关节的应力分布特点,推知小关节退变的起始部位或受累较严重的部位,有助于更好地预防和诊治小关节疾病。

参考文献:

- [1] Panjabi MM, Goel V, Oxland T, *et al.* Human lumbar vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy [J]. Spine, 1992, 17(3): 299-306.
- [2] Panjabi MM, Oxland T, Takata K. Articular facets of the human spine. Quantitative three-dimensional anatomy [J]. Spine, 1993, 18(10): 1298-1310.
- [3] Tanno I, Murakami G, Oguma H, *et al.* Morphometry of the lumbar zygapophyseal facet capsule and cartilage with special reference to degenerative osteoarthritic changes: An anatomical study using fresh cadavers of elderly Japanese and Korean subjects [J]. J Orthop Sci, 2004, 9(5): 468-477.
- [4] Duan CY, Espinoza AA, Shott S, *et al.* In vivo measurement of the subchondral bone thickness of lumbar facet joint using magnetic resonance imaging [J]. Osteoarthritis

- Cartilage, 2011, 19(1): 96-102.
- [5] Keller TS, Moeljanto E, Main JA, *et al.*, Distribution and orientation of bone in the human lumbar vertebral centrum [J]. *J Spinal Disord*, 1992, 5(1): 60-74.
- [6] Yan J, Zhao B, Wang L, *et al.* Marker-controlled watershed for lymphoma segmentation in sequential ct images [J]. *Med Phys*, 2006, 33(7): 2452-2460.
- [7] Masharawi Y, Rothschild B, Salame K, *et al.* Facet tropism and interfacet shape in the thoracolumbar vertebrae: Characterization and biomechanical interpretation [J]. *Spine*, 2005, 30(11): 281-292.
- [8] Feydy A, Pluot E, Guerini H, *et al.* Role of imaging in spine hand and wrist osteoarthritis [J]. *Rheum Dis Clin North Am*, 2009, 35(3): 605-649.
- [9] Matsumoto M, Watanabe K, Ishii K, *et al.*, Posterior decompression surgery for extraforaminal entrapment of the fifth lumbar spinal nerve at the lumbosacral junction [J]. *J Neurosurg Spine*, 2009, 12(1): 72-81.
- [10] Kafchitsas K, Kokkinakis M, Habermann B, *et al.* Effect of lumbar disc replacement on the height of the disc space and the geometry of the facet joints: A cadaver study [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2010, 92(4): 595-601.
- [11] Taylor JR, Twomey LT. Age changes in lumbar zygapophyseal joints observations on structure and function [J]. *Spine*, 1986, 11(7): 739-745.
- [12] Lewin T, Moffett B, Vidik A. The morphology of the lumbar synovial intervertebral joints [J]. *Acta Morphol Neerl Scand*, 1962, 4: 299-319.
- [13] Fujiwara A, Tamai K, Yamato M, *et al.* The relationship between facet joint osteoarthritis and disc degeneration of the lumbar spine: An mri study [J]. *Eur Spine J*, 1999, 8(5): 396-401.
- [14] Eubanks JD, Lee MJ, Cassinelli E, *et al.* Prevalence of lumbar facet arthrosis and its relationship to age, sex, and race: An anatomic study of cadaveric [J]. *Spine*, 2007, 32(19): 2058-2062.
- [15] Ha KY, Chang CH, Kim KW. Expression of estrogen receptor of the facet joints in degenerative spondylolisthesis [J]. *Spine*, 2005, 30(5): 562-566.
- [16] Enatsu A. Musculoskeletal rehabilitation and bone. Abnormal bone metabolism in female elite athletes [J]. *Clin Calcium*, 2010, 20(4): 543-550.
- [17] Leppanen OV, Sievanen H, Jokihara J, *et al.* The effects of loading and estrogen on rat bone growth [J]. *J Appl Physiol*, 2010, 108(6): 1737-1744.
- [18] Vandenput L, Ohlsson C. Sex steroid metabolism in the regulation of bone health in men [J]. *J Steroid Biochem Mol Biol*, 2010, 121(3-5): 582-588.
- [19] Takatori R, An HS, Ochia RS, *et al.* In vivo measurement of lumbar facet joint width and density distribution [C]// The 52nd Meeting of Orthopaedic Research Society. Chicago: [s. n.]: 2006.
- [20] Buttermann GR, Schendel MJ, Kahmann RD, *et al.* In vivo facet joint loading of the canine lumbar spine [J]. *Spine*, 1992, 17(1): 81-92.
- [21] 苏再发, 张爱平, 陈日齐. 应用三维有限元法分析腰椎小关节的力学分布[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2007, 11(9): 1671-1674.
- [22] 张国川, 石国生, 宋朝晖. 垂直载荷下的下腰椎生物力学实验[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 12(35): 6819-6822.