

· 基础研究 ·

站立活动腰椎小关节三维 CT 测量[△]

陈焕雄, 文王强, 李国军, 徐浩翔, 张泽佩, 苗 军*

(海南医学院第一附属医院脊柱外科, 海南海口 570102)

摘要: [目的] 分析站立活动时腰椎小关节 (lumbar facet joint, LFJ) 在体三维运动学特征。[方法] 招募 10 名无腰椎疾病的志愿者。通过高分辨 CT 获取志愿者腰椎模型并与双荧光透视成像系统获取的图像相匹配, 可再现 LFJ 瞬时运动状态, 并分析其位移和旋转角度等运动学特征。[结果] 屈伸运动中, 在 L₄~L₅ 节段的旋转范围最大 (3.6±2.7)° (P>0.05)。平移范围在 L₅S₁ 节段最大 (P>0.05)。左右平移范围在前后方向上 (Y 轴方向) L₃~L₄ 右侧显著大于左侧 [(0.9±0.5)mm vs (0.4±0.5)mm, P<0.05], L₄~L₅ 节段左侧显著大于右侧 [(1.6±0.8)mm vs (1.1±0.4)mm, P<0.05]。侧弯运动中, 在 L₃~L₄ 节段的旋转范围最大 (4.9±4.4)° (P<0.05)。平移范围在 L₃₋₄ 节段最大 (P>0.05)。L₄~L₅ 水平的左右 LFJ 平移范围在左右方向 (X 轴方向) 左侧显著大于右侧 [(0.7±0.5)mm vs (0.6±0.4)mm, P<0.05]。旋转运动中, L₃~L₄ 节段的旋转范围最大 (2.6±1.7)°, L₃~L₄ 水平的左右 LFJ 平移范围在左右方向上 (X 轴方向) 右侧显著大于左侧 [(0.7±0.5)mm vs (0.6±0.4)mm, P<0.05]。[结论] LFJ 在体运动特征与其运动方式有关, 复杂姿势以耦合运动为主。

关键词: 腰椎小关节, 在体运动, 运动范围, 不对称性

中图分类号: R681.57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 09-0828-05

Three-dimensional CT measurement of lumbar facet joints in standing activities // CHEN Huan-xiong, WEN Wang-qiang, LI Guo-jun, XU Hao-xiang, ZHANG Ze-pei, MIAO Jun. Department of Spine and Osteopathic Surgery, The First Affiliated Hospital, Hainan Medical University, Haikou 570102, Hainan, China

Abstract: [Objective] To analyze the three-dimensional kinematic characteristics of the lumbar facet joint (LFJ) activity when standing. **[Methods]** Ten volunteers without lumbar disease were recruited, and underwent high-resolution CT and dural fluoroscopy examinations. The lumbar spine model of the volunteers was established matched with the images obtained by the dural fluoroscopic imaging system to reproduce the instantaneous motion state of LFJ, and analyze its kinematic characteristics, such as displacement and rotation angle. **[Results]** In term of flexion and extension, the maximum rotation range was (3.6±2.7)° at L₄~L₅ segments (P<0.05), while the maximum translation range was at L₅S₁ segments (P<0.05). The left-right translation range at L₃~L₄ was significantly greater on the right side than on the left side [(0.9±0.5)mm vs (0.4±0.5)mm, P<0.05], while which at L₄~L₅ segment proved greater on the left than the right [(1.6±0.8)mm vs (1.1±0.4)mm, P<0.05]. In term of lateral bending motion, the maximum rotation range was (4.9±4.4)° in L₃~L₄ segments (P<0.05), while the maximum translation range was at L₃₋₄ segments (P<0.05). The translational range of LFJ at the L₄~L₅ level was significantly greater on the left than on the right [(0.7±0.5)mm vs (0.6±0.4)mm, P<0.05]. In term of rotation motion, the rotation range of L₃~L₄ was the largest (2.6±1.7)°, and the translation range of L₃~L₄ was significantly larger on the right than the left [(0.7±0.5)mm vs (0.6±0.4)mm, P<0.05]. **[Conclusion]** The movement characteristics of LFJ are related to its movement mode, with complex postures dominated by coupled motion.

Key words: lumbar facet joint, in vivo motion, range of motion, asymmetry

腰椎小关节 (lumbar facet joint, LFJ) 是由相邻腰椎上下位关节突及外部的关节囊共同构成, 与椎间盘共同传导和限制脊柱的运动模式^[1]。随着腰痛发生率逐年增加, 研究者发现由于 LFJ 退变引起的腰痛及下肢放射性疼痛占慢性腰痛患者的比例高达 15%~

45%^[2]。而关于 LFJ 的研究主要集中在尸体研究^[3]、动物模型^[4]及影像学分析等^[5, 6], 这些技术均不能完全展现小关节的生理运动模式并且精度较差。

双平面荧光透视成像系统 (dual fluoroscopic imaging system, DFIS) 是一种新的无创体内成像技术,

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.09.12

[△]基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 82160435)

作者简介: 陈焕雄, 副主任医师, 研究方向: 脊柱外科, (电话) 13111941188, (电子信箱) chenhuaxiong86@163.com

* 通信作者: 苗军, (电话) 18920322787, (电子信箱) mj6688@163.com

可再现人体骨骼体内瞬时运动姿态,目前已广泛应用于腰椎^[7]、关节等^[8]骨科领域的研究。具有精度高、重复性好、设备局限性小等优点^[9]。因此,本研究拟借用DFIS和CT相结合技术,测量健康参与者站立位姿势下LFJ在体三维运动学特征。

1 材料与方 法

1.1 研究对象

2017年4月~2021年3月,选择健康志愿者10名,所有入选志愿者脊柱发育均正常,腰椎活动正常,体重指数18~25 kg/m²,骨密度正常,椎间盘退变Pfirrmann分级≤II级。既往均无脊柱手术史及存在脊柱关节畸形、退变性腰椎疾病,无处妊娠期女性。其中男5例,女5例,年龄25~39岁,平均(32.4±5.2)岁。本研究符合医院医学伦理委员会要求,每位受试者在实验前均签署知情同意书。

1.2 检测方法

1.2.1 腰椎三维模型重建

志愿者平躺于CT(Siemens, Germany)床上,行CT薄层扫描获得L₃~S₁椎体横断面图像(层厚为0.75 mm,分辨率为512像素×512像素),保存为DICOM格式。然后导入Mimics19.0(Materialise's Interactive Medical Image Control System,比利时)软件中,根据特定阈值范围建立L₃~S₁节段的三维模型(图1a,1b)。

1.2.2 双荧光透视成像

双荧光透视成像系统(dual fluoroscopic imaging system, DFIS)由两台垂直摆放“C”形臂X线机组成(图1c)。在两名专业脊柱外科医师的指导下,协助受试者约束髋关节和膝关节的活动,保证受试者腰椎在活动时始终处于两台“C”形臂X线机交叉投射范围之内。分别进行前屈后伸运动、左右侧弯运动、左右旋转运动,并在相应位置采集X线图像。所有受试志愿者均需统一穿戴铅制防辐射围领、围裙以最大程度降低腺体放射损伤。

1.2.3 重现LFJ的瞬时运动

在Rhinoceros软件中可再现椎体的三维瞬时运动。其匹配方法为:勾勒出在C形臂X线机获取的腰椎解剖轮廓,必须包括重要附件结构,如椎体、上下关节突和棘突等,通过对各个椎体的平移和旋转,使腰椎模型能够同时匹配两个相互垂直的透视图像,从而实现二维和三维图像的匹配(图1d)。最后可重现LFJ的在体瞬时运动姿势(图1e)。

1.2.4 建立LFJ笛卡尔坐标系

首先在椎体中心建立右手笛卡尔坐标系(图1f),并指定小关节面的中心。最后通过将椎体中心建立的坐标系移动到LFJ的中心点,即可以建立LFJ笛卡尔坐标系(图1g),最后可根据重现的LFJ瞬时活动姿势模型计算两个相邻关节的相对活动数据(图1h)。

该笛卡尔坐标系定义X轴为垂直于椎体的矢状面并指向左侧,Y轴为平行于椎体的矢状面并指向棘突背部,Z轴为垂直于椎体的冠状面并指向头侧。X、Y、Z轴分别代表空间中的方向向量,沿X、Y、Z轴旋转的角度分别为 α 、 β 和 γ 。

1.3 测量指标

测量屈伸活动旋转角与位移,左右侧弯活动旋转角与位移和左右旋转活动旋转角与位移。

1.4 统计学方法

采用SPSS 23.0(IBM, Armonk, NY, USA)软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示,资料呈正态分布时,两侧比较采用配对T检验,不同平面间比较采用单因素方差分析,两两比较采用LSD法,资料呈非正态分布时,采用秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 屈伸运动旋转角与位移

测量结果见表1。LFJ主要沿中外侧轴(X轴)旋转($\alpha > \beta$ 、 γ),并沿着颅尾方向(Z轴方向)平移($Z > X$ 、 Y)。结果显示,对于旋转:LFJ在L₄~L₅节段的屈伸旋转角(α)最大,在L₅~S₁节段最小。围绕不同轴旋转角在腰椎节段L₃~S₁间比较均无统计学意义($P > 0.05$)。对于平移:LFJ平移主要发生在颅尾方向(Z轴)平移,并且在L₅~S₁节段平移幅度最大,围绕不同轴位移范围在腰椎节段L₃~S₁间比较均没有统计学意义($P > 0.05$),L₃~L₄以及L₄~L₅水平的左右平移范围在前后方向上(Y轴方向),L₃~L₄右侧显著大于左侧($P < 0.05$),L₄~L₅节段左侧显著大于右侧。

2.2 左右侧弯运动旋转角与位移

LFJ主要沿前后轴(Y轴)旋转($\beta > \alpha$ 、 γ),并主要沿着颅尾方向(Z轴方向)平移($Z > X$ 、 Y)。结果显示,对于旋转角:LFJ在L₃~L₄节段沿Y轴旋转角(β)最大,而在L₅~S₁节段最小。沿着X轴及Z轴方向耦合旋转运动范围几乎一致,且各个旋转角在腰椎节段L₃~S₁间比较均没有统计学意义($P > 0.05$)。

对于平移：LFJ 平移主要发生在颅尾方向（Z 轴）平移，并且在 L₃~L₄ 节段平移幅度最大，围绕不同轴位移范围在腰椎节段 L₃~S₁ 间比较均没有统计学意义（ $P>0.05$ ）。在 L₄~L₅ 水平的左右 LFJ 的平移范围在左右方向（X 轴方向）左侧显著大于右侧。

2.3 左右旋转运动旋转角与位移

LFJ 的初级旋转轴为颅尾轴（Z 轴），并沿着颅尾方向（Z 轴方向）平移（ $Z>X、Y$ ）。结果显示，对于旋转角：旋转范围最大是沿着耦合轴即前后轴方向

（Y 轴）运动（ $\beta>\alpha、\gamma$ ），最大旋转角在 L₃~L₄ 节段，各个旋转角在腰椎节段 L₃~S₁ 间比较均没有统计学意义（ $P>0.05$ ）。对于平移：平移主要发生在颅尾方向（Z 轴），并且在 L₃~S₁ 节段平移幅度最大。腰椎节段 L₃~S₁ 水平间比较，平移在 Z 轴方向上，右侧小关节在 L₅~S₁ 节段平移范围最大且差异显著（ $P<0.05$ ），其他方向差异无统计学意义（ $P>0.05$ ）。L₃~L₄ 水平的左右 LFJ 的平移范围在左右方向上（X 轴方向）右侧显著大于左侧（ $P<0.05$ ）。

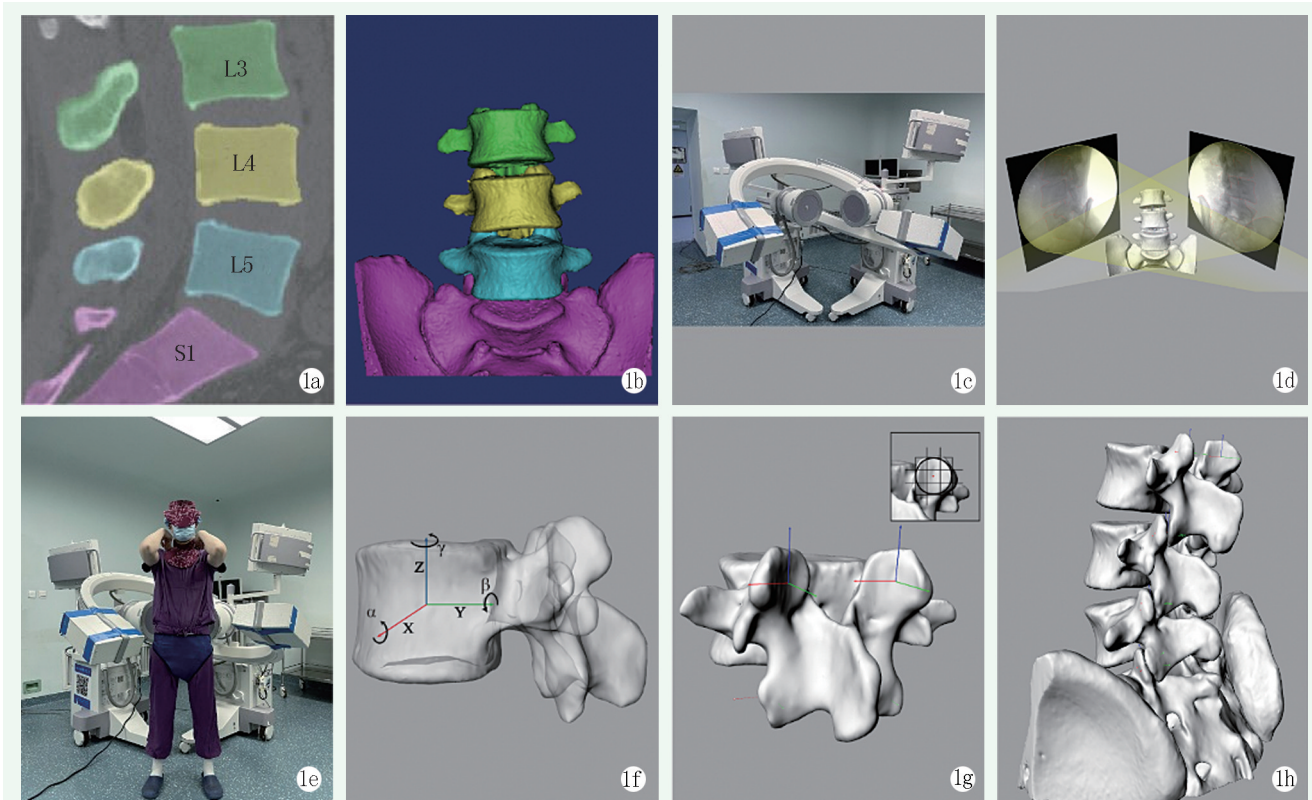


图 1 站位活动腰椎小关节三维 CT 测量 1a: 选取建模范围 1b: 建立三维模型 1c: DIFS 系统 1d: 腰椎模型匹配 1e: 腰椎瞬时活动 1f: 椎体中心建立标准笛卡尔坐标系 1g: 在 LFJ 中心建立笛卡尔坐标系 1h: 模型重现、数据处理

3 讨论

LFJ 退行性改变是引起腰椎退变及下腰痛发生的一大主要原因^[2]。在过去，受限于研究技术的影响，对 LFJ 的研究绝大部分都是体外研究。体外研究因其不能真实展现 LFJ 的生理运动特征逐步退出研究者的视野。在这项体内研究中，作者使用了 DFIS 与 CT 相结合的技术，研究了志愿者在生理状态下屈伸、弯曲和旋转的 LFJ 体内运动学数据。该技术具备精确性和可重复性，其运动学的精度为平移 $<0.43\text{ mm}$ ，旋转 $<0.65^\circ$ ^[10]。

本结果提示，小关节体内运动模式与身体姿势有

关，在屈伸及侧弯时运动方式均沿着初级旋转轴做运动，而在旋转等复杂运动中显示出以不同方向的耦合运动为主。在躯干旋转运动时，初级旋转轴为头尾轴，而旋转运动范围最大却是在耦合轴前后轴中发现的。在 Li^[11] 的研究中同样发现，腰椎退变患者在进行旋转运动时运动范围是围绕着耦合轴进行增加的。这提示生理活动时耦合运动在承担躯干应力及剪切力的同时，耦合轴旋转范围的增加会引起关节面之间的压缩应力的增加，并有可能促进软骨撞击概率增加从而引起下腰痛^[12]。同时，LFJ 的平移运动主要方向是沿着头颅方向进行位移。这可能与 LFJ 骨性结构以及腰部肌肉、韧带的平衡牵引有关。孟庆兰^[13] 通过尸体研究发现，腰椎关节面角度是由矢状位向冠状位转变，这使得 LFJ 在运动时颅尾方向受限较少。

表 1 LFJ 不同运动姿势下在体三维运动学数据 ($\bar{x} \pm s$)

运动姿态	指标与节段	左侧平移	右侧平移	P 值	旋转角 (°)
屈伸运动	X (mm)				α (°)
	L ₃ ~L ₄	0.9±0.6	0.9±0.6	0.997	3.2±2.3
	L ₄ ~L ₅	0.7±0.7	0.7±0.7	0.991	3.6±2.7
	L ₅ ~S ₁	0.9±0.5	0.8±0.4	0.143	2.7±2.5
	P 值	0.816	0.838		0.746
	Y (mm)				β (°)
	L ₃ ~L ₄	0.4±0.5	0.9±0.5	0.016	2.1±1.6
	L ₄ ~L ₅	1.6±0.8	1.1±0.4	0.043	1.1±0.7
	L ₅ ~S ₁	1.0±1.0	1.0±1.2	0.995	0.9±0.9
	P 值	0.14	0.858		0.057
	Z (mm)				γ (°)
	L ₃ ~L ₄	1.8±1.6	1.7±1.2	0.760	1.4±0.9
L ₄ ~L ₅	1.6±1.1	1.8±1.3	0.529	2.6±2.5	
L ₅ ~S ₁	2.1±1.7	2.1±1.8	0.836	0.8±0.7	
P 值	0.797	0.797		0.052	
侧弯运动	X (mm)				α (°)
	L ₃ ~L ₄	0.8±0.6	0.8±0.6	0.078	1.3±1.4
	L ₄ ~L ₅	0.7±0.5	0.6±0.4	0.029	1.4±1.0
	L ₅ ~S ₁	0.6±0.3	0.7±0.2	0.151	1.6±1.5
	P 值	0.851	0.467		0.822
	Y (mm)				β (°)
	L ₃ ~L ₄	0.6±0.3	0.6±0.3	0.590	4.9±4.4
	L ₄ ~L ₅	1.0±0.6	0.6±0.4	0.115	3.4±2.1
	L ₅ ~S ₁	0.9±0.5	1.1±0.7	0.389	2.1±2.1
	P 值	0.132	0.210		0.153
	Z (mm)				γ (°)
	L ₃ ~L ₄	1.8±1.4	1.4±1.2	0.324	1.2±1.2
L ₄ ~L ₅	0.8±0.6	1.2±0.8	0.314	1.6±1.3	
L ₅ ~S ₁	1.2±1.1	1.2±1.1	0.890	1.2±0.6	
P 值	0.161	0.085		0.639	
旋转运动	X (mm)				α (°)
	L ₃ ~L ₄	0.6±0.4	0.7±0.5	0.024	0.9±0.6
	L ₄ ~L ₅	0.6±0.4	0.6±0.4	0.750	1.5±1.3
	L ₅ ~S ₁	0.5±0.3	0.5±0.4	0.621	1.7±1.3
	P 值	0.075	0.681		0.267
	Y (mm)				β (°)
	L ₃ ~L ₄	0.4±0.3	0.5±0.4	0.792	2.6±1.7
	L ₄ ~L ₅	0.4±0.4	0.6±0.3	0.495	2.5±2.1
	L ₅ ~S ₁	1.1±0.7	0.8±1.1	0.476	1.3±1.0
	P 值	0.006	0.453		0.173
	Z (mm)				γ (°)
	L ₃ ~L ₄	1.1±0.8	0.7±0.4	0.199	1.4±1.1
L ₄ ~L ₅	1.1±1.1	0.7±0.6	0.429	1.0±0.7	
L ₅ ~S ₁	1.2±0.7	1.6±1.0	0.374	2.0±1.1	
P 值	0.917	<0.001		0.109	

脊椎椎间盘和小关节作为复合结构对脊椎的稳定性非常重要^[14]。此研究中,左右LFJ的平移范围存在着不对称性($P<0.05$)。当双侧LFJ的运动不对称时,会导致LFJ表面局部面积的变化,扭转力增加将造成局部压缩载荷不平衡,并可能会进一步加剧LFJ退行性改变。在Ko等^[15]在社区人群中的调查研究中同样发现,LFJ不对称的患者下腰痛患病率为46.3%。本研究数据可以为这一观点提供理论基础。

综上所述,通过DFIS与CT相结合的技术,测量了LFJ在不同运动中的位移和旋转等基础数据。测量结果可作为基线,并与病理条件下的LFJ进行比较,可为脊柱疾病的发生机制的理解提供新的思路。同时,也可以为人工椎间盘、假体等置入物的制备提供相关依据。

参考文献

- [1] Maher TR, O'Brien M, Dryer JW, et al. The role of the lumbar facet joints in spinal stability. Identification of alternative paths of loading [J]. *Spine*, 1994, 19 (23) : 2667-2670.
- [2] Manchikanti L, Hirsch JA, Pampati V. Chronic low back pain of facet (zygapophysial) joint origin: Is there a difference based on involvement of single or multiple spinal regions [J]. *Pain Physician*, 2003, 6 (4) : 399-405.
- [3] Adams MA, Hutton WC. The mechanical function of the lumbar apophyseal joints [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1983, 8 (3) : 327-330.
- [4] Wood KB, Schendel MJ, Pashman RS, et al. In vivo analysis of canine intervertebral and facet motion [J]. *Spine*, 1992, 17 (10) : 1180-1186.
- [5] 刘锁利,陈仲强,李选河.退变腰椎小关节的CT形态学观察[J].*中国矫形外科杂志*,2001,8(5):446-448.
- [6] 陈宏亮,丁文元,李宝俊,等.腰椎关节突关节退变的影像学改变及意义[J].*中国矫形外科杂志*,2009,17(19):1482-1485.
- [7] Li G, Wang S, Passias P, et al. Segmental in vivo vertebral motion during functional human lumbar spine activities [J]. *Eur Spine J*, 2009, 18 (7) : 1013-1021.
- [8] Torry MR, Shelburne KB, Peterson DS, et al. Knee kinematic profiles during drop landings: a biplane fluoroscopy study [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43 (3) : 533-541.
- [9] Wang S, Passias P, Li G, et al. Measurement of vertebral kinematics using noninvasive image matching method-validation and application [J]. *Spine*, 2008, 33 (11) : E355-E361.
- [10] Bai J, Hu Y, Du L, et al. Assessing validation of dual fluoroscopic image matching method for measurement of in vivo spine kinematics [J]. *Chin Med J*, 2011, 124 (11) : 1689-1694.
- [11] Li W, Wang S, Xia Q, et al. Lumbar facet joint motion in patients with degenerative disc disease at affected and adjacent levels: an in vivo biomechanical study [J]. *Spine*, 2011, 36 (10) : E629-E637.
- [12] Dunlop RB, Adams MA, Hutton WC. Disc space narrowing and the lumbar facet joints [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1984, 66 (5) : 706-710.
- [13] 孟庆兰.腰椎上关节面方位角变化规律及其临床意义[J].*中国临床解剖学杂志*,2002,20(4):283-285.
- [14] 郭增峰,于滨生.腰椎小关节骨性关节炎的研究进展[J].*中国矫形外科杂志*,2017,25(17):1587-1591.
- [15] Ko S, Chae S, Choi W, et al. The prevalence of facet tropism and its correlation with low back pain in selected community-based populations [J]. *Clin Orthop Surg*, 2019, 11 (2) : 176-182.

(收稿:2022-10-18 修回:2023-02-27)
(同行评议专家:陈 锋 崔 赓)
(本文编辑:宁 桦)