

基于 CT 三维重建的上颈椎三维活动度在体测量研究

寨旭¹, 康健², 陈欣³, 董军⁴, 邱晓文⁴, 丁新爱¹, 刘俊¹, 贺西京⁴

(1. 西安交通大学第二附属医院急诊科, 陕西 西安 710004; 2. 宝鸡市中医医院骨科, 陕西 西安 710004; 3. 西安交通大学第二附属医院影像科, 陕西 西安 710004; 4. 西安交通大学第二附属医院骨科, 陕西 西安 710004)

【摘要】 目的: 采用 CT 三维重建的方法测量健康成年人上颈椎寰枕关节、寰枢关节的各个方向上的活动度及其耦合运动, 以及颈椎病患者上颈椎最大旋转位的三维活动度, 并作对比分析, 同时验证所使用的测量方法的可靠性。方法: 2014 年 1 月至 2015 年 6 月, 选取 20 个健康成年受试者(健康成年组), 其中男 11 例, 女 9 例, 年龄 22~26(24.0±1.2)岁; 26 个颈椎病患者(颈椎病组), 其中男 24 例, 女 2 例, 年龄 36~72(52.8±8.6)岁。采集健康成年人中立位、最大右侧旋转位、最大右侧侧屈位及最大屈曲位、最大背伸位 5 个位置的及颈椎病患者中立位、最大右侧旋转位上颈椎(含枕骨大孔)的 CT 图像。利用软件 Mimics 将所得 CT 重建为三维图像。在各个椎体(或枕骨)上选取明显的解剖标志点进行标注, 根据所标注的解剖标志点建立局部坐标系, 局部坐标系即代表了所在椎体的位置及方向。利用 Pro/Engineer 及 MATLAB 软件运算出上位椎体(或枕骨)相对下位椎体的活动度及颈部整体三维活动度, 并比较颈椎病组和健康成年组差异。因解剖标志点识别有人为差异, 选取两名实验员进行 3 次测量, 用组内相关系数(组内 ICC)和组间相关系数(组间 ICC)验证实验方法的可靠性。结果: 可靠性验证结果: 组内 ICC、组间 ICC 结果均在 0.90 以上, 测量方法有很高的可靠性; 健康成年组上颈椎三维活动度: 最大右侧旋转位时, 寰枕关节有(-6.8±1.5)°的耦合左侧屈和(8.9±2.0)°的耦合背伸活动, 其余 3 个位置寰枕关节各方向活动度均很小, 最大为(5.3±2.6)°; 最大右侧旋转位时寰枢关节右旋(37.9±5.1)°, 占整个颈椎活动度[(72.4±5.0)°]的 52.34%, 其余 3 个位置寰枢关节仍以旋转活动最为突出; 上位椎体(或枕骨)相对下位椎体的平移距离均很小。颈椎病患者颈椎整体平均轴向旋转角度[(62.0±3.4)°]较健康成年组明显下降, 但寰枕关节、寰枢关节的平均轴向旋转角度比较健康成年组没有明显差异($P>0.05$)。结论: (1) 基于 CT 三维重建的方法能够很好的描述颈椎的这种复杂的三维运动, 并且有很高的可靠性。(2) 上颈椎运动是一个复杂的三维运动过程, 各个方向活动时均附带有其他方向上的耦合运动。(3) 颈椎病患者最大旋转位上颈椎旋转方向的活动度较健康成年人没有明显变化。

【关键词】 上颈椎; 三维重建; 三维活动度; 在体测量

中图分类号: R681.5

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.07.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



In vivo measurement of three-dimensional motion of the upper cervical spine using CT three-dimensional reconstruction ZHAI Xu, KANG Jian, CHEN Xin, DONG Jun, QIU Xiao-wen, DING Xin-ai, LIU Jun, and HE Xi-jing*. *Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, Shaanxi, China

ABSTRACT Objective: Using the CT three-dimensional reconstruction to measure the activity degree of atlanto-occipital joint and the atlantoaxial joint in different directions and its coupling movement in healthy volunteers, and three dimensional motion range of the maximum rotation position of the upper cervical spine of cervical spondylosis patients, and to analyze the differences, verifying the reliability of the method at the meantime. **Methods:** From January 2014 to June 2015, 20 healthy adult subjects (healthy adult group), and 26 patients with cervical spondylosis (cervical spondylosis group) were selected. In healthy adult group, there were 11 males and 9 females, aged from 22 to 26 years old with an average of (24.0±1.2) years, and in cervical spondylosis group, there were 24 males and 2 females, aged from 36 to 72 years old with an average of (52.8±8.6) years. Healthy adults underwent CT examination in neutral position, maximum right rotation, maximum right lateral bending, maximum flexion and extension, and cervical spondylosis patients underwent CT examination in neutral position, maximum right rotation. Then the software Mimics was used to reconstruct occiput (Oc), atlas (C₁) and axial (C₂) vertebral three-dimensional

基金项目: 陕西省重点研发计划(编号: 2017ZDCXL-SF-01-05)

Fund program: Shaanxi Key Research and Development Program (No. 2017ZDCXL-SF-01-05)

通讯作者: 贺西京 E-mail: xijing_h@sina.com

Corresponding author: HE Xi-jing E-mail: xijing_h@sina.com

image. Three virtual non-collinear markers were positioned on prominent structures of foramen magnum, C₁ and C₂. The 3D spatial coordinates of these virtual anatomical markers entail the definition of an anatomical local coordinate system which represent the position and orientation of the bones. Segmental motions were calculated using Eulerian angle in three major planes, and the difference between cervical spondylosis group and healthy adult group were compared. Due to the inaccuracy in anatomical landmark identification, two groups were measured 3 times, and the reliability of the experimental method was verified by the intra-group correlation (intra-group ICC) and the inter-group correlation coefficient (inter-group ICC). **Results:** Reliability verification results; the intra-group ICC and inter-group ICC results were all above 0.90, and the measurement method had high reliability. Three-dimensional activity of the upper cervical spine in healthy adults; the atlanto-occipital joint had (-6.8±1.5)° coupled left lateral bending and (8.9±2.0)° coupled extension in the maximum right rotation position, and the motion of atlanto-occipital joint had low activity [maximum was (5.3±2.6)°] in the remaining 3 positions; the rotation of atlanto-axial joint was (37.9±5.1)°, accounting for 52.34% of the total cervical spine activity [(72.4±5.0)°] in the maximum right rotation position, and rotational motion was still prominent in the remaining three positions. The relative translations of the upper cervical spine in all direction were small. The average axial rotation angle [(62.0±3.4)°] of the total cervical spine in cervical spondylosis group was significantly lower than that in the healthy adult group, but the mean axial rotation angles of the atlanto-occipital and the atlantoaxial joint were not significantly different from those of the healthy adults (P>0.05). **Conclusion:** The three-dimensional CT reconstruction method has high reliability, which can be applied to measure the movement of spine. The upper cervical spine contributed the most to the direction of rotation, and the movement in all directions are accompanied by coupled motion in the other direction. There was no significant difference in the rotation of the upper cervical spine between cervical spondylosis patients and normal subjects.

KEYWORDS Upper cervical spine; Three-dimensional reconstruction; Three-dimensional movement; In vivo measurement

上颈椎包括寰枕关节和寰枢关节两个主要关节。外伤、类风湿性关节炎、先天性疾病等可以导致寰枢关节不稳定，治疗这些疾病的方法目前多由前路或后路寰枢椎融合或二者结合的办法予以固定^[1]。然而，所有的融合、固定手术方法均会导致头颈部活动度相当大的损失，并因此影响患者的生活质量。为了解决这个问题，有研究者设计多种人工寰齿关节装置^[2]。研究人工寰齿关节需要更深入的了解上颈椎生物力学。上颈椎与下颈椎的活动形式有明显差异，作为一个独立的生物力学系统，上颈椎对颈部活动及稳定性有重要的作用^[3]。由于上颈椎的周围结构及运动形式复杂，因此在体测量一直是一个难点，目前上颈椎生物力学研究多见于在尸体上的离体测量^[4]，但离体测量仅对了解解剖结构，考察基本运动可以提供一些参考信息，其获得的生物力学数据与健康成年人差异较大。随着科技的进步，三维 CT、三维 MRI 为上颈椎的生物力学研究提供了新的方法^[5-6]。本试验于 2014 年 1 月至 2015 年 6 月召集健康成年志愿者及在西安交大二附院骨科住院治疗的颈椎病患者，利用 CT 三维重建技术及自行设计的程序测量上颈椎在中立位、最大右侧旋转位、最大右侧侧屈位、最大屈曲、最大背伸位的三维活动度，并对颈椎病最大旋转位的上颈椎活动度进行对比。

1 资料与方法

1.1 纳入标准

(1)健康成年组：健康成年人，发育正常；近 6 个月无颈项部酸痛等不适感，无四肢乏力、麻木、酸痛

等症状，无颈椎疾病服药史；颈项部查体无异常，四肢腱反射正常，Hoffmann 征、Babinski 征、踝阵挛等病理征阴性；颈椎 CT 检查无异常；同意参与实验并签署知情同意书。(2)颈椎病组：病史、查体符合神经根型或脊髓型颈椎病诊断标准^[7]；神经根型颈椎病患者 MRI 检查提示神经根受压并与患者症状相符；脊髓型颈椎病患者 MRI 检查明确脊髓受压并与症状相符；同意参与实验并签署知情同意书。

1.2 排除标准

有颈部畸形、外伤病史；既往有颈椎手术史；MRI 检查提示合并有其他颈部疾病者。

1.3 一般资料

2014 年 1 月至 6 月招募 20 例健康成年志愿者，男 11 例，女 9 例，年龄 22~26 岁。2014 年 1 月至 2015 年 6 月招募 26 例颈椎病患者，男 24 例，女 2 例，年龄 36~72 岁。两组志愿者基线资料对比分析见表 1。

表 1 两组志愿者一般资料比较

Tab.1 Comparison of general data between the two groups of volunteers

组别	例数	年龄($\bar{x}\pm s$, 岁)	性别(例)	
			男	女
健康成年组	20	24.0±1.2	11	9
颈椎病组	26	52.8±8.6	24	2
检验值		$t=16.663$	$\chi^2=8.648$	
P 值		0.000	0.003	

1.4 研究方法

1.4.1 获取 CT 断层图像 按要求分别 CT 扫描每位受试者,扫描范围从枕骨斜坡到 C₃ 椎体。扫描体位:健康成年组分别扫描每位受试者的 5 个体位,即:中立位、最大右侧旋转位、最大右侧侧屈位、最大前屈位、最大背伸位。为了减少辐射量,健康成年组每位受试者只采集单侧(即右侧)最大旋转、侧屈位时的 CT 图像。颈椎病组分别扫描每位受试者的 2 个体位,即:中立位和最大右侧旋转位。

扫描操作:在中立位时,嘱受试者仰卧于 CT 平台上,使 Frankfurt 平面垂直 CT 平台^[8],同时使受试者的矢状面垂直于 CT 平台,头颈所在轴线平行于该平台。保持头颈部及双肩的位置不动采集 CT 图像。在扫描最大右侧旋转位时,嘱受试者仰卧于 CT 平台上并把头从中立尽可能向右侧旋转头部,保持颈部尽量不屈伸或侧曲,采集此位置 CT 图像。为保证颈部旋转在轴向平面上,嘱受试者旋转过程中眼睛注视 CT 机环形机身的中心部位。扫描最大右侧侧屈位图像时,受试者头部在平行于地面的一个平面上尽可能向右侧弯曲,嘱受试者眼睛注视正上方,保持头部不做轴向旋转。最大屈曲位时,受试者头部在医师帮助下尽可能向前屈曲,然后用一个支持设备垫于受试者头部。最大背伸位时,头部伸出 CT 机平面,然后指导受试者尽可能背伸头部并保持于该位置不动。在屈曲、背伸过程中,保持头颈部的矢状面垂直于 CT 的平台。

1.4.2 图像的三维重建 运用 Mimics 16.0 三维重建软件对 CT 图像进行三维空间的重建。首先将两组所有扫描好的 CT 图像依次导入 Mimics 软件中,将骨组织图像从导入的所有 CT 图像信息中提取出来。利用橡皮擦工具将椎间隙、关节突关节在冠状面、矢状面、轴位面上进行分割,同时利用画笔工具将椎体中缺损部位进行填充。每完成一个椎体进行三维重建,重建效果见图 1。

1.4.3 三维坐标系的建立及三维活动度的计算

每个椎体(或枕骨)都有独立的局部坐标系,该局部坐标系代表了椎体(或枕骨)的位置及方向。局部坐标系是基于国际生物力学学会提供的方法^[9]建立的:解剖标志点手工标记在枕骨大孔、C₁、C₂ 的突出结构上,依据这些解剖标记点的三维空间坐标定义解剖结构的局部坐标系,该局部坐标系代表了椎体骨(或枕骨)的位置及方向。X 轴被定义为枕骨大孔的最大前后径并指向前方,Z 轴穿过枕骨大孔最大前后径的中点、平行于枕骨大孔的平面并垂直于 X 轴指向右侧。Y 轴垂直于 X、Z 轴并指向上方,如图 2a 所示。对于 C₁ 和 C₂ 椎体,Z 轴穿过左右横突的后结节指向右侧。X 轴平行于下椎板、穿过棘突的顶点同时垂直于 Z 轴指向前方。Y 轴垂直于 X、Z 轴指向上方,如图 2b,2c 所示。枕骨相对于 C₁、C₂ 椎体是比较特别的结构,因此需要单独定义它的坐标系。

本试验基于 MATLAB(Mathworks 公司,版本号:R2009a)软件自行设计批处理文件,将每个椎体解剖标志点的三维坐标输入该批处理文件后,自动生成该椎体的局部坐标系。坐标系的原点定义为椎体的几何中心,原点坐标由三维软件 Pro/Engineer(PTC 公司,版本号:Wildfire)求得。

选择最常用的度量三维空间旋转的方法即欧拉角计算椎体间的相对运动,计算工具为基于 MATLAB 软件自行设计的批处理文件。计算旋转过程中欧拉角的顺序定义为:Z-Y-X,即先行屈伸运动,然后为旋转运动,最后为侧屈运动。正值代表右旋、左侧屈和屈曲方向的旋转。另外,椎体或枕骨大孔的中心从中立位到最大旋转位的移动被分解到 3 个轴上,正值分别代表向右、向前、向上。

1.5 观察项目与方法

1.5.1 测量方法可靠性验证 试验中在建立局部坐标系而标点时主要依赖于手工操作,所以需要对测量方法的可靠性进行验证。让两名实验员(A,B)

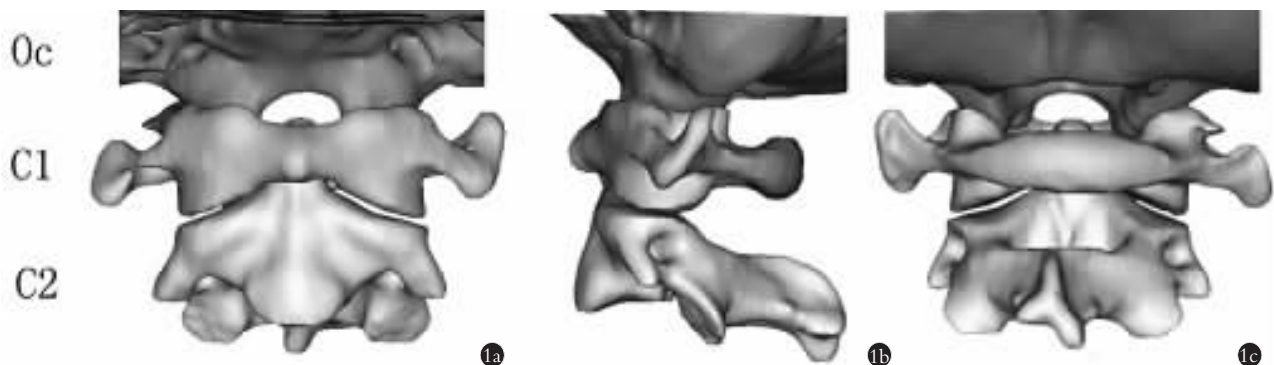


图 1 上颈椎三维重建后的模型 1a. 正面观 1b. 侧面观 1c. 后面观

Fig.1 Three-dimensional reconstruction of the upper cervical spine 1a. Positive view 1b. Lateral view 1c. Backward view

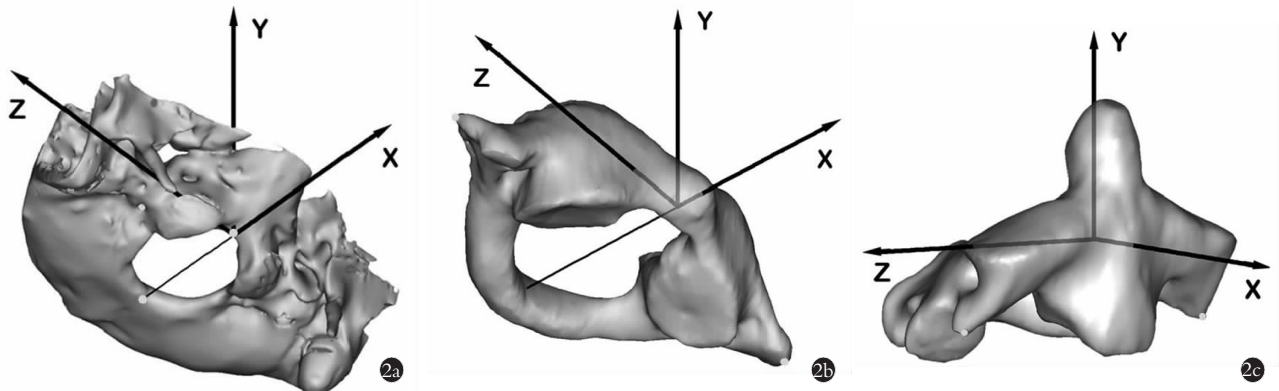


图 2 上颈椎局部坐标系示意图 2a. 枕骨的局部坐标系 2b. 寰椎的局部坐标系 2c. 枢椎的局部坐标系

Fig. 2 Schematic diagram of the local coordinate system of the upper cervical vertebra 2a. The local coordinate system of the occipital bone 2b. The local coordinate system of the atlas 2c. The local coordinate system of the axis

按相同规则对所有健康成年组中立位及最大右侧旋转位的三维图像分别进行解剖位置标记, 实验员 A 对所有要求标记点标记 2 次, 实验员 B 标记 1 次。对比实验员 A 2 次测量结果, 计算组内相关系数(ICC)验证测量者内的可靠性。对比实验员 A 第 1 次测量结果与实验员 B 测量的结果, 计算组间相关系数验证测量者间可靠性。

1.5.2 健康成年组颈部整体三维活动度的测量
即头部相对于躯干的三维活动度。测量健康成年组成员的颈部整体三维活动度, 因实验对象做 CT 检查时躯干部位相对 CT 机是固定的, 实际测量中以头部相对 CT 机平台的三维活动度代替。将枕骨三维坐标数据和 CT 机原始坐标数据导入计算程序, 计算出颈部整体三维活动度(仅旋转活动度)。

1.5.3 健康成年组上颈椎各节关节活动度测量
寰枕关节三维活动度测量: 将最大右旋转位的局部坐标系数据及同一椎体(或枕骨)中立位局部坐标系数据, 导入计算程序计算出最大右旋转位时寰枕关节的三维活动度, 即轴向旋转角度、屈伸方向上旋转角度、侧屈方向上旋转角度, 以及在上下、左右、前后方向上的相对位移; 以同样的方法计算出最大前屈位、最大背伸位、最大右侧侧屈位时的三维活动度。

1.5.4 两组最大右侧旋转位三维活动度情况比较
以同样的测量方法测量出颈椎病组最大右旋位的上颈椎各关节的三维活动度, 同时与健康成年组对比。

1.6 统计学处理

采用 SPSS 20.0 对试验数据进行统计学处理, 定量数据用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 两组数据采用独立样本 *t* 检验进行统计分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 可靠性验证结果

2.1.1 测量者内可靠性分析 比较实验员 A 2 次

测量结果, 利用 ICC 进行测量者内可靠性分析。结果显示寰枕旋转、伴随屈伸、伴随侧屈, 寰枢旋转、伴随屈伸、伴随侧屈等方向上的测量者内 ICC 为: 0.96、0.97、0.94、0.98、0.94、0.96。

2.1.2 测量者间可靠性分析 比较实验员 A 第 1 次测量结果和实验员 B 测量结果, 利用 ICC 进行测量者间可靠性分析。结果显示在寰枕旋转、伴随屈伸、伴随侧屈, 寰枢旋转、伴随屈伸、伴随侧屈等方向上的测量者间 ICC 为: 0.94、0.95、0.92、0.96、0.92、0.96。

2.2 健康成年组颈部整体三维活动度

颈部整体三维活动度测量结果见表 2, 由结果可以看出, 健康成年组颈椎单侧旋转活动度可达 70° 以上, 侧屈、屈曲、背伸活动度均为 40° 左右。颈椎旋转时伴有较明显的同向侧屈 (9.3±4.4)° 及小幅度的后伸 (4.4±5.1)°; 侧屈时伴随明显同向旋转和背伸(均为 10° 左右); 屈伸活动时伴随活动极小。

表 2 健康成年组 20 位受试者颈部整体三维活动度 ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)
Tab. 2 3D rotations of the whole neck of in healthy adult group of 20 volunteers ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

活动方向	旋转	侧屈	屈伸
最大右侧旋转位	72.4±5.0	9.3±4.4	4.4±5.1
最大右侧侧屈位	10.5±8.3	39.6±6.2	10.1±6.3
最大屈曲位	-0.5±2.8	1.1±4.4	-42.3±4.6
最大背伸位	-0.8±4.5	1.7±2.4	41.7±7.0

注: 轴向旋转、侧屈正值表示方向向右, 屈伸的正值表示背伸
Note: The direction of rotation and lateral bending was rightward, and the positive value in flexion-extension direction was extension

2.3 健康成年人上颈椎各节关节活动度测量结果

2.3.1 寰枕关节三维活动度 头部做各方向活动时活动时, 经 CT 扫描三维重建后, 利用解剖标志点

标注法进行测量, 得出寰枕关节旋转角度及其耦合运动情况见表 3。

表 3 健康成年组 20 位受试者头部各方向活动时寰枕关节的三维活动情况 ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

Tab.3 Intervertebral rotations for atlanto-occipital joint in the maximal axial rotation (right), lateral bending (right), flexion and extension in healthy adult group of 20 volunteers ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

活动方向	旋转	侧屈	屈伸
最大右侧旋转位	3.9±3.0*	-6.8±1.5	8.9±2.0
最大右侧侧屈位	3.3±2.4	1.1±2.0*	4.0±3.5
最大前屈位	-0.3±1.5	-0.1±1.4	-3.5±2.4*
最大后伸位	-0.2±2.5	1.4±0.8	5.3±2.6*

注: 轴向旋转、侧屈方向正值向右, 屈伸方向上正值表示背伸; *与头部活动方向相同, 其余数值为耦合运动

Note: The direction of rotation and lateral bending was rightward, and the positive value in flexion-extension direction was extension; *the same direction as the head movement, and the rest were coupled motions

颈椎椎体的旋转活动同时伴有椎体的向各方向的平移活动, 平移活动情况利用椎体的几何中心的坐标位置计算得出上位椎体相对下位椎体的平移情况, 平移数据见表 4。

表 4 健康成年组 20 位受试者头部各方向活动时枕骨大孔中心相对寰椎的位移活动情况 ($\bar{x} \pm s, \text{mm}$)

Tab.4 Intervertebral translations for foramen magnum center relative to the atlas in the maximal axial rotation (right), lateral bending (right), flexion and extension in healthy adult group of 20 volunteers ($\bar{x} \pm s, \text{mm}$)

活动方向	左右方向	前后方向	上下方向
最大右侧旋转位	-0.0±1.2	2.6±0.8	-1.9±0.8
最大右侧侧屈位	-0.1±1.0	0.1±0.9	-0.8±1.0
最大前屈位	0.2±0.8	0.4±0.5	-0.1±0.6
最大后伸位	0.0±0.5	-0.0±0.6	-0.6±0.6

注: 正值代表右向平移、前向平移、上方平移

Note: Positive values represent right translation, forward translation, and top translation

2.3.2 寰枢关节的三维活动度 头部做各方向活动时, 经 CT 扫描三维重建后, 利用解剖标志点标注法进行测量, 得出寰枢关节旋转角度及其耦合运动情况见表 5。

头部向各个方向活动时, 以寰椎几何中心为参照, 求出寰椎几何中心相对枢椎的在 3 个主要平面上的平移距离, 其结果如见 6。

表 5 健康成年组 20 位受试者头部各方向活动时寰枢关节的三维活动情况 ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

Tab.5 Intervertebral rotations for atlantoaxial joint in the maximal axial rotation (right), lateral bending (right), flexion and extension in healthy adult group of 20 volunteers ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

活动方向	耦合旋转	耦合侧屈	耦合屈伸
最大右侧旋转位	37.9±5.1*	-4.8±1.0	-5.5±2.6
最大右侧侧屈位	-14.0±5.8	1.8±1.9*	1.1±2.3
最大前屈位	-0.9±2.6	-0.6±0.7	0.3±1.5*
最大后伸位	-0.8±3.7	-0.1±0.8	-0.7±2.6*

注: 轴向旋转、侧屈方向正值向右, 屈伸方向上正值表示背伸; *与头部活动方向相同, 其余数值为耦合运动

Note: The direction of rotation and lateral bending was rightward, and the positive value in flexion-extension direction was extension; *the same direction as the head movement, and the rest were coupled motions

表 6 健康成年组 20 位受试者头部各方向活动时寰椎中心相对枢椎的位移活动情况 ($\bar{x} \pm s, \text{mm}$)

Tab.6 Intervertebral translations for atlas center relative axial vertebra in the maximal axial rotation (right), lateral bending (right), flexion and extension in healthy adult group of 20 volunteers ($\bar{x} \pm s, \text{mm}$)

活动方向	左右方向	前后方向	上下方向
最大右侧旋转位	-0.9±1.3	-0.2±0.6	-0.8±1.1
最大右侧侧屈位	0.5±0.8	0.4±0.8	0.2±0.8
最大前屈位	-0.0±0.6	0.5±0.4	0.6±0.5
最大后伸位	-0.6±0.8	0.7±0.6	0.6±0.5

注: 正值代表右向平移、前向平移、上方平移。

Note: Positive values represent right translation, forward translation, and top translation

2.4 两组最大右侧旋转位三维活动度情况比较

颈椎病组上颈椎寰枕关节、寰枢关节的在头部运动至最大右侧旋转位时的活动度及与健康成年组比较的差异性见表 7。

颈椎病组颈椎 (Oc-C₇) 总的轴向旋转角度为 (62.0±3.4)°, 健康成年组颈椎总的轴向旋转角度为 (72.4±5.0)°, 颈椎病组颈部整体轴向旋转角度较健康成年组明显下降 (P=0.000)。

颈椎病组中上颈椎 (Oc-C₂) 总的轴向旋转角度为 (40.3±3.8)°, 并且上颈椎占全颈椎总的轴向旋转角度的 65.00%; 健康成年组中上颈椎总的轴向旋转角度为 (44.0±8.0)°, 上颈椎占颈部整体轴向旋转角度的 60.77%, 颈椎病组上颈椎轴向旋转角度占颈部整体旋转角度比例较健康成年组高。

颈椎病组 C₁-C₂ 节段平均轴向旋转角度为

表 7 两组头部运动至最大右侧旋转位时寰枕关节和寰枢关节的三维活动角度比较($\bar{x}\pm s, ^\circ$)

Tab.7 Comparison of intervertebral rotations for atlanto-occipital joint and atlantoaxial joint in the maximal right axial rotation($\bar{x}\pm s, ^\circ$)

组别	例数	寰枕关节			寰枢关节		
		轴向旋转	耦合侧屈	耦合屈伸	轴向旋转	耦合侧屈	耦合屈伸
颈椎病组	26	4.4±2.8	-4.6±0.7	11.4±1.9	34.6±3.3	-6.1±3.6	-5.7±2.2
健康成年组	20	3.9±3.0	-6.8±1.5	8.9±2.0	37.9±5.1	-4.8±1.0	-5.5±2.6
t 值		-1.450	2.183	3.007	1.973	2.828	-1.547
P 值		0.159	0.038	0.006	0.058	0.009	0.132

注:轴向旋转、侧屈方向正值向右,屈伸方向上正值表示背伸

Note: The direction of rotation and lateral bending was rightward, and the positive value in flexion-extension direction was extension

(34.6±3.3)°, 占全颈椎总的平均轴向旋转角度的 55.80%; 健康成年组 C₁-C₂ 节段平均轴向旋转角度为 (37.9±5.1)°, 占全颈椎总的平均轴向旋转角度的 52.34%。

当头部运动至最大右侧旋转位时,除了耦合旋转以外,颈椎还有耦合位移运动的发生。枕骨大孔中心相对寰椎的位移:向右(0.3±0.6) mm,向后(0.4±0.3) mm,向下(0.4±0.2) mm,寰椎几何中心相对枢椎位移:向右(0.5±0.3) mm,向后(0.5±0.3) mm,向下(0.3±0.3) mm。此结果与健康成年组差异有统计学意义(P>0.05)。

3 讨论

3.1 上颈椎三维活动度测量研究现状

颈椎各节段活动度的测量一直是人体生物力学的研究热点。由于在体测量难度较大,离体测量是主要的研究策略,发展出多种测量方法,如:影像学测量法^[10]、光学测量法^[11]、光电测量法^[2]。随着影像技术、计算机的进展,有些学者研究出基于 X 线^[12]、动态 X 线^[13]、双平面 X 线^[14]、CT^[8]、MRI^[6]等影像技术的在体测量颈椎各阶段三维活动度的方法。

在本研究中,笔者使用的可视解剖标记方法来测量上颈椎的耦合运动。这是首次使用 CT 三维重建测量上颈椎在最大旋转位、最大侧屈位及屈伸位的 6 个自由度,以期更完整地描述上颈椎的耦合运动。使用 MRI 方法进行三维重建的方法在采集图像时具有无辐射的优势,但三维重建 MRI 在骨骼成像方面弱于三维 CT 重建^[6]。这会降低三维重建的质量。另外, MRI 需要 5~10 min 获取数据,这比 CT 拍摄时间长 50 倍以上。受试者长时间保持最大屈伸、侧屈、旋转等体位具有一定困难。鉴于此,笔者选择了 CT 的三维重建来测量上颈椎活动度。

可视解剖标志标点方法已被其他一些学者在测量脊柱活动度中所使用,如 Salem 等^[8]使用此方法测量颈椎旋转时各椎体的三维活动度。该试验选择的

解剖标志点均为突出的解剖点,因此该测量方法的可靠性较高:测量者间、测量者内 ICC 均在 0.9 以上,ICC 在 0.75 以上即为可靠性极高。另外,笔者对本方法的验证与 Salem 等^[8]对本方法的验证具有很高的一致性。本方法的精度在目前测量颈椎耦合运动的方法中并不是最高的,但该方法具有极高的灵活性,对于不完整颅骨的重建仍适用。而另一种精度更高的三维图形体素重叠法^[6]或体积合并法^[15]都依赖于不同位置的同一个椎骨或颅骨具有相同的三维形状。本试验中,为了减少辐射量,没有扫描整个颅骨,而仅对枕骨大孔进行完整扫描,因此颅骨在各种不同的位置被扫描的范围是不同的,所以容积重叠法并不适用,因此选择具有更高适用性的解剖标志标点法来测量上颈椎的活动度。

3.2 健康成年人上颈椎数据分析

3.2.1 旋转及其耦合运动

因普通 X 线等方法不能测量上颈椎旋转方向上的活动,因此 CT 或 MRI 对旋转方向上的研究具有较大的优势,并且有一些学者已使用 CT 或 MRI 进行上颈椎活动度的测量。本研究的结果与其他的使用三维 CT 或 MRI 的研究结果具有很好的一致性。本文所得到的寰枢关节旋转角度(37.9±5.1)°的结果与之前的那些在体内研究的结果相类似。但一些离体研究其描述寰枕关节轴向旋转大致占整个颈椎的 60%,这比本研究结果要大^[4,16-17]。寰枕关节的轴向旋转角度很小。Bogduk 等^[5]认为这归因于寰枕关节的特异性解剖结构,因寰枕关节可形象的比喻为“摇篮”结构,寰椎上关节的关节窝为摇篮,而枕骨髁突则放置其中。当头颅旋转时,此结构会限制寰枕关节的旋转活动。耦合侧屈运动在表在之前的研究中均较小且方向一致,但 Lai 等^[17]的使用双平面 X 测得的寰枕关节的耦合运动方向与其他研究相反。寰枕关节的耦合背伸活动在头部旋转时是比较明显的,Lai 等^[16]、Ishii 等^[6]、Salem 等^[8]的研究均有超过 10°的背伸活动。寰枢关

节的耦合背伸活动度较小, 大部分研究背伸角度的大小一致, 但是, Lai 等^[16]使用双平面 X 线的研究结果显示耦合屈伸运动为屈曲方向, 大小为 0.5°, 这也与其他研究不同。双平面 X 线检查采用直立的体位, 而 CT 或 MRI 检查必须使用仰卧的体位, 这可能是造成这些不同的主要原因; 另外, 双平面 X 线研究方法精度较差 (轴向旋转为 1.5°, 侧屈方向为 4.5°, 屈伸方向为 3.0°), 这也会对测量结果造成一些影响。

头部各方向活动时, 枕骨相对于寰椎或寰枕相对于枢椎有不同程度的位移, 其方向被分解到冠状面、矢状面及轴位上来表述。在本研究中除了枕骨相对于寰椎有 (1.9±0.8) mm 向下平移和 (2.6±0.8) mm 的向前的平移, 其他方向上的平移量都十分微小, 均不足 1 mm。这与 Ishii 等^[6]、Salem 等^[8]的结果基本一致, 各方向位移活动均较小, 仅部分方向上有超过 1 mm 的位移。这些研究与本研究结果的不同点在于最大位移方向或有不同, 如 Ishii 等^[6]研究显示: 在头部旋转时, 有明显的侧向移动发生, 而在本研究以及 Salem 等^[8]研究中, 该方向的平移相对很小。在这些研究中, 上位椎体 (或枕骨) 相对下位椎体运动时, 所选用的参考点没有统一的标准, 有些研究应用重心作为参照, 另外一些研究应用几何中心, 还有一些应用椎体的中心。选用的参考点不同势必会造成平移距离的差异, 但目前并没有任何机构或个人提出广泛接受的参考标准。

3.2.2 侧屈及其耦合运动 关于侧屈及其耦合运动, 目前已经有一些离体标本上的研究提供了上颈椎的定量数据^[4], 但只有一个在体研究^[18]使用 MRI 三维重建研究上颈椎的三维活动度。在本次试验研究中, 上颈椎对颈部侧屈 (寰枕关节 1.06°, 寰枢关节 1.8°) 贡献很少。耦合的轴向旋转在寰枕关节处比较明显, 试验中可观察到 13.99° 的与侧屈相反方向的耦合旋转运动, 这与寰枢关节的解剖结构相关, 寰枢外侧关节并不是水平的, 当侧方受力时, 可造成寰椎的受力侧向前滑移, 因此可有较大角度耦合旋转运动。同时, 联系到头部旋转时的耦合运动, 笔者发现, 在头部旋转时, 寰枢关节同向旋转中伴有一定角度的对侧侧屈活动, 因此可以得出结论, 在头部单纯侧屈或旋转时, 寰枢关节的旋转总是与对侧侧屈相耦合。此结果与 Ishii 等^[18]的研究相吻合。寰枕关节的耦合旋转运动方向与侧屈方向相同, 为 3.3°。在 Ishii 等^[18]的研究中, 寰枕关节耦合侧屈运动并没有明显方向性, 且侧屈角度很小 (-0.2±1.0)°。因此, 寰枕关节的侧屈运动和旋转运动并没有固定的耦合方式。侧屈时的耦合屈伸在寰枢关节几乎看不到。寰枕关

节的耦合背伸为 (3.96±3.49)°, 但方向是不恒定的。因此可以得出, 侧屈时上颈椎的耦合屈伸运动是很小的, 而且方向并不固定, 主要原因可能是在侧屈时颈部前后受力并不恒定。

3.2.3 屈伸及其耦合运动 本试验为首次使用三维重建 (CT 或 MRI) 的方法研究健康成年人的颈椎在体的运动力学。以往是使用标本进行离体的研究以及使用 X 线方法测量上颈椎运动学的的数据。Panjabi 等^[4]离体研究得出寰枕关节、寰枢关节屈伸方向活动度都在 22.4° 以上, 这些数据并不是三维活动度的数据, 只是屈伸方向上的数据。Lind 等^[19]利用双平面 X 线方法测量寰枕关节、寰枢关节屈伸方向上的活动度分别为 14°、13°。本研究的上颈椎 2 个关节在屈伸方向活动度明显小于之前的这些研究。原因是本试验为在体的研究, 与离体颈椎相比有更多的韧带肌肉的牵拉、限制, 活动度相对较小; 另外一个原因是在试验中受试者采取仰卧体位, 这种体位生物力学不同于直立位的颈椎的生物力学。

屈伸活动时上颈椎几乎观察不到耦合运动, 耦合旋转及耦合平移与其他方向相比均是最小的。这种现象可以通过上颈椎的解剖结构来解释: 寰枕关节及寰枢关节均是左右对称的关节, 在屈伸活动时, 两侧关节受力均衡, 并不会导致明显的耦合旋转、侧屈活动。

3.3 颈椎病患者数据分析

经过对健康成年人上颈椎各方向的三维活动度研究后发现, 上颈椎主要在旋转方向向上提供较多的支持, 因此, 笔者进一步研究了颈椎病患者上颈椎旋转位的三维活动度, 并与健康成年人作对比。

颈椎病与健康成年人基线资料差异较大, 根据 Nilsson 等^[20]实验结果, 颈部整体旋转活动度 50~59 岁组健康人较 20~29 岁组下降约 7.5%, 而无明显性别差异, 因颈椎病患者同年龄段志愿者寻找困难, 因此, 以不同年龄志愿者作对比分析。颈椎病组颈部整体旋转活动度较健康成年组明显下降。但颈椎病组年龄较健康成年组高, 按 Nilsson 等^[20]试验结果推测与颈椎病组同龄的健康成年人颈椎活动度在 66.97° 左右, 较颈椎病组活动度大, 因此推测, 颈椎病人颈部整体活动度较健康人有下降。

颈椎病组的寰枕关节、寰枢关节的平均轴向旋转角度较健康成年组差异无统计学意义 (P>0.05); 从以上结果可以看出, 颈椎病能够造成颈椎轴向旋转能力的显著下降。尽管上颈椎在颈部旋转动作的完成过程中发挥着主要作用, 但颈椎病却未能明显影响上颈椎的轴向活动。因此推断颈椎活动度的丢失主要为下颈椎的活动度减少造成的。有学者^[21]研

究指出, C₄-C₅ 是颈椎骨刺最为常见和明显的节段。颈椎的退变表现为椎间盘含水量降低, 椎间隙狭窄, 骨质增生, 骨赘形成, 韧带的钙化等, 而这些综合的因素则造成了此节段的旋转角度的丢失。Nagamoto 等^[22]在实验中发现, 颈椎病组在轴向旋转时在 C₅-C₆ 和 C₆-C₇ 上较健康成年组有明显下降。因此推断颈椎病对颈椎活动度的影响主要表现在下颈椎节段。

颈椎病组上颈椎 2 个节段的位移活动度与健康成年人组在各个方向的数值差异均无统计学意义, 说明颈椎病患者上颈椎的稳定性没有受到明显影响。

3.4 结论

通过本次试验, 得出了以下几个结论: (1) 第 1 次全面描述上颈椎在体的最大旋转位、侧屈位、屈伸位三维活动度。本试验基于 CT 三维重建的测量颈椎三维活动度方法, 能够很好地描述颈椎复杂的三维运动, 并且具有很高的可靠性。(2) 上颈椎颈椎的运动是一个复杂的三维运动过程, 它不仅表现在肉眼所见的方向上的运动(主运动), 还包括在其他方向上、同时发生的、不同运动形式的运动(耦合运动)。(3) 颈椎病患者颈椎的整体旋转活动度较健康成年人有明显下降, 但上颈椎旋转方向的活动度较健康成年人没有明显变化。

参考文献

- [1] Goel A, Laheri V. Plate and screw fixation for atlanto-axial subluxation[J]. *Acta Neurochirurgica*, 1994, 129(1-2): 47-53.
- [2] Cai X, He X, Li H, et al. Biomechanical evaluation of the total atlanto-odontoid joint arthroplasty system: an in vitro human cadaveric study[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2013, 28(4): 357-363.
- [3] Menezes AH, Traynelis VC. Anatomy and biomechanics of normal craniovertebral junction (a) and biomechanics of stabilization (b) [J]. *Childs Nerv Syst*, 2008, 24(10): 1091-1100.
- [4] Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26(24): 2692-2700.
- [5] Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics[J]. *Clin Biomech*, 2000, 15(9): 633-648.
- [6] Ishii T, Mrkai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the upper cervical spine in rotation: in vivo three-dimensional analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(7): E139-E144.
- [7] 中国康复医学会. 颈椎病诊治与康复指南[M]. 北京: 中国康复医学会, 2010: 1-13.
Chinese Association of Rehabilitation Medicine. Guidance for the Diagnosis, Treatment and Rehabilitation of Cervical Spondylosis [M]. Beijing: Chinese Association of Rehabilitation Medicine, 2010: 1-13. Chinese.
- [8] Salem W, Lenders C, Mathieu J, et al. In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during maximal axial rotation [J]. *Manual Therapy*, 2013, 18(4): 339-344.
- [9] Wu G, Siegler S, Allard P, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. *International Society of Biomechanics* [J]. *J Biomech*, 2002, 35(4): 543-548.
- [10] Zuhlke T, Fine J, Houghton VM, et al. Accuracy of dynamic computed tomography to calculate rotation occurring at lumbar spinal motion segments [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2009, 34(6): E215-E218.
- [11] Heuer F, Schmidt H, Claes L, et al. A new laser scanning technique for imaging intervertebral disc displacement and its application to modeling nucleotomy [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(3): 260-269.
- [12] 洪瑛, 邓宇骁, 刘浩, 等. 单节段颈椎间盘置换术中颈椎体位对术后颈椎中立位生理轴线重建的影响[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2013, 27(1): 62-65.
HONG Y, DENG YX, LIU H, et al. Influence of intraoperative cervical posture in single segmental cervical disc replacement on restoration of cervical curve in neutral position [J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2013, 27(1): 62-65. Chinese.
- [13] Liu F, Cheng J, Komisted RD, et al. In vivo evaluation of dynamic characteristics of the normal, fused, and disc replacement cervical spines [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(23): 2578-2584.
- [14] Lee S, Harris KG, Nassif J, et al. In vivo kinematics of the cervical spine. Part I: Development of a roentgen stereophotogrammetric technique using metallic markers and assessment of its accuracy [J]. *J Spinal Disord*, 1993, 6(6): 522-534.
- [15] Ochia RS, Inoue N, Renner SM, et al. Three-dimensional in vivo measurement of lumbar spine segmental motion [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31(18): 2073-2078.
- [16] Lai H, Moriya H, Goto S, et al. Three-dimensional motion analysis of the upper cervical spine during axial rotation [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1993, 18(16): 2388-2392.
- [17] Dugailly PM, Sobczak S, Sholukha V, et al. In vitro 3D-kinematics of the upper cervical spine: helical axis and simulation for axial rotation and flexion extension [J]. *Surg Radiologic Anatomy*, 2010, 32(2): 141-151.
- [18] Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the cervical spine in lateral bending: in vivo three-dimensional analysis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31(2): 155-160.
- [19] Lind B, Sihlbom H, Nordwall A, et al. Normal range of motion of the cervical spine [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1989, 70(9): 692-695.
- [20] Nilsson N, Hartvigsen J, Christensen HW. Normal ranges of passive cervical motion for women and men 20-60 years old [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 1996, 19(5): 306-309.
- [21] 高岩, 刘振利, 刘艳兵, 等. 脊髓型颈椎病病因病理研究现状 [J]. *河北北方学院学报(医学版)*, 2009, 16(6): 76-77.
GAO Y, LIU ZL, LIU YB, et al. Status of etiology and pathology of cervical spondylotic myelopathy [J]. *He Bei Bei Fang Xue Yuan Xue Bao (Yi Xue Ban)*, 2009, 16(6): 76-77. Chinese.
- [22] Nagamoto Y, Ishii T, Sakaura H, et al. In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with cervical spondylosis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(10): 778-783.

(收稿日期: 2018-08-02 本文编辑: 王宏)