

# 人体脊柱三维运动测量分析方法新进展

邱晓文,贺西京,黄思华,梁宝宝,喻姿瑞  
(西安交通大学第二附属医院骨科,陕西 西安 710004)

**【摘要】** 脊柱各节段间的相对运动与脊柱专科有着相当密切的联系。脊柱运动范围的测量随着科学技术的发展以及各类计算方法的优化,各种测量方法相继出现,从影像学方法到非影像学方法,从二维平面测量到三维空间离体测量,从直接在 X 线片上测量读取数据到计算机自动计算并分析给出数据。脊柱运动范围测量有向多种方法联合以及在体脊柱研究倾斜的趋势,越来越多的研究者开始关注在体脊柱的研究。本文通过梳理近年来脊柱生物力学领域的文献,对各种现今运用的脊柱运动测量方法进行分析,指出其主要进展和不足,以及各方法的应用前景,为脊柱运动测量的研究与应用提供参考和帮助。

**【关键词】** 脊柱; 运动; 成像,三维; 生物力学; 综述文献

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2015.05.021

**New progress on three-dimensional movement measurement analysis of human spine** QIU Xiao-wen, HE Xi-jing, HUANG Si-hua, LIANG Bao-bao, and YU Zi-rui. Department of Orthopedics, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, Shaanxi, China

**ABSTRACT** Spinal biomechanics, especially the range of spine motion, has close connection with spinal surgery. The change of the range of motion (ROM) is an important indicator of diseases and injuries of spine, and the essential evaluating standards of effect of surgeries and therapies to spine. The analysis of ROM can be dated to the time of the invention of X-ray and even that before it. With the development of science and technology as well as the optimization of various types of calculation methods, diverse measuring methods have emerged, from imaging methods to non-imaging methods, from two-dimensional to three-dimensional, from measuring directly on the X-ray films to calculating automatically by computer. Analysis of ROM has made great progress, but there are some older methods cannot meet the needs of the times and disappear, some classical methods such as X-ray still have vitality. Combining different methods, three dimensions and more vivo spine research are the trend of analysis of ROM. And more and more researchers began to focus on vivo spine research. In this paper, the advantages and disadvantages of the methods utilized recently are presented through viewing recent literatures, providing reference and help for the movement analysis of spine.

**KEYWORDS** Spine; Movement; Imaging, three-dimensional; Biomechanics; Review literature

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2015, 28(5): 676-681 www.zggszz.com

脊柱各节段间的相对运动与脊柱专科有着相当密切的联系。脊柱相关疾病的诊治、脊柱损伤后对脊柱运动功能的影响、不同脊柱内固定术式的疗效评价都需要脊柱运动测量学的辅助。如何准确而简便测量脊柱三维运动一直是医学生物力学领域致力于解决的关键问题。目前脊柱运动三维测量主要分为在体脊柱及立体脊柱测量,在体脊柱测量方法主要用于临床检查,离体脊柱测量主要用于科学研究;但是近几年来,随着科学技术的发展以及各种计算方法的优化,科研中应用在体脊柱进行研究的越来越多。生物力学的研究受到人力及物力的限制较大,所以有些经典研究方法如 X 线没有随着新技术的出

现消亡,同时出现的新技术又为脊柱运动分析提供了新的思路与方法。虽然季伟等<sup>[1]</sup>曾对脊柱活动度测量方法有所综述,但是随着时代和技术的发展,有必要对各种新旧脊柱运动分析方法再次进行系统的梳理与总结,提供脊柱运动测量领域的未来发展趋势,同时也为脊柱运动测量提供一定的帮助与思路。

## 1 脊柱运动的特点

脊柱是人体重要的支撑和负荷结构,但同时脊柱又具有相当的柔韧性,因而脊柱的活动复杂而多变。整个脊柱在三维空间中的运动幅度很大,但是个椎体间相对运动却较小,主要由各椎骨的连结结构(椎间盘、韧带以及小关节)的变形所形成。椎体间的相对运动在三维空间的运动主要为相对角度的改变及相对位移:角度的改变体现在 6 个自由度上,即前屈/后伸、左/右侧屈以及左/右旋转;相对位移主要

通讯作者:贺西京 E-mail: xijing\_h@vip.tom.com  
Correspond author: HE Xi-jing E-mail: xijing\_h@vip.tom.com

为上/下、左/右以及前/后;在脊柱运动时椎体间相对角度的改变和相对位移往往同时存在,而且整体的运动有各节段的微小运动复合构成,因而造成了脊柱运动的极端复杂性。通常我们定义脊柱受力方向上的运动为主运动(main motion),把其他方向的运动称之为耦合运动(coupled motion)<sup>[2]</sup>。如脊柱承受轴向旋转力矩时表现出轴向运动为主运动,而伴随的侧屈或后伸运动为耦合运动。

## 2 脊柱运动的参数表示及数学方法

由于椎体的自身形变较小,因而在脊柱生物力学中将之视为刚体,而将椎体的连结结构视为可变形体;近年来对脊柱某一节段的研究越来越多,所以又出现将头部、胸部或者骨盆视为刚体的研究理论,如要研究颈椎的运动,可将头部及胸部视为刚体,而颈椎为可变形体。刚体运动学理论中,每个刚体在运动中有 6 个自由度,即描述一个刚体的运动需要 6 个独立的参数,对应到椎体的运动就是前屈/后伸、左/右侧屈、左/右旋转 6 个方向的角度改变,以及上下、左右及前后的位移。

脊柱节段的运动通常采用脊柱运动范围(range of motion, ROM)<sup>[2]</sup>来表示脊柱节段间的角度变化。同时在一些更为详细精确地描述椎体运动时会引入平均旋转中心(mean center of rotation, MCR)的概念<sup>[3]</sup>。由于椎体在矢状面上的运动是由旋转和平移两种运动复合而成,所以椎体的旋转轴始终在改变,这些不同的旋转轴被称为瞬时旋转中心(instant center of rotation, ICR)。所以在研究椎体的整个运动过程时更倾向于平均旋转中心。

脊柱生物力学分析尤其是运动范围的描述通常使用向量角及欧拉角<sup>[4]</sup>。向量角(vector angle)普遍使用于二维平面的脊柱节段运动范围的描述,此方法简单易用,能够基本满足二维平面的脊柱运动范围的描述。但是三维空间中运动范围的分析需要更加有效地数学工具,三维角度的分析不是简单地把几个二维的角度经过计算得出,而应该在三维空间中计算。瑞士数学家欧拉发现一个刚体相对于另一个刚体的方向可以被与一组确定的转轴相关的连续三个旋转角描述。现在欧拉角广泛应用于计算给定转轴的角度计算,通常是垂直轴。欧拉角只与节段的方向以及他的相对坐标系有关。因此应用欧拉角进行脊柱节段运动的分析可以避免涉及复杂的平均旋转中心的计算。

## 3 脊柱在体运动的测量

### 3.1 影像学方法

影像学方法主要应用 X 线、CT 及 MRI 的三维重建来进行分析。随着装备技术及电脑技术的发展,

以上几项技术有结合运用以增加可行性和准确性的趋势。

X 线是最早也是最基本的脊柱在体运动测量方法。随着技术的发展,X 线片也从最初的平片发展到双平面及动态测量等。脊柱尤其是颈椎及腰椎的过屈过伸侧位片是临床分析脊柱运动比较常用的方法。此方法简便易行,价格低廉。但是 Nizard 等<sup>[5]</sup>认为此方法缺乏相应的诊断标准,以及由于体位摆放的等原因可重复性较差。同时使用传统 X 线片难以得到旋转以及侧屈运动数据。虽然双平面 X 线片和动态 X 线片能弥补一定的缺陷,但是由于辐射剂量以及操作难度等问题,是这些方法受到限制。但是 Zheng 等<sup>[6]</sup>提出了一项用二维脊柱侧位片进行椎体三维重建的新方法,他们使用该方法及 CT 三维重建对 4 例受试者的腰椎分别进行重建,并对重建后的模型进行表面对比,两组模型能够很好的重合。此方法能够用于脊柱运动分析、手术计划以及术中导航,但是需要进一步完善及测试。

计算机断层扫描(CT)可以获得所检部位的多个层面的详细数据,发现平片不能显示的解剖改变,并能利用数据进行三维重建及测量。Salem 等<sup>[7]</sup>采用低剂量 CT 分别扫描受试者中立位时与最大旋转时的颈椎,分析颈椎旋转时的配对运动。该测量方法较 X 线有更高精确度,可达 0.1°及 0.1 mm,更高空间分辨率及可重复性。但该方法只能测量极限位置的运动数据,不能进行动态测量,且体位影响较大;获取数据时间及重建计算量较大,且辐射量角 X 线更大。

磁共振扫描(MRI)可以获得脊柱任何切面的影像及数据;并且现在已经从二维平面发展到三维立体,能够直接重建显示三维图像。Nagamoto 等<sup>[8]</sup>采用 3DMRI 对 20 例健康自愿者及 12 例颈椎病患者在平卧位对颈椎旋转运动进行测量并重建,通过图像处理及应用欧拉角进行角度计算来分析颈椎病患者与健康人相比在旋转参数的改变。测量时患者处于平卧位,但是平卧位不是日常活动的常用体位,因而颈椎负荷改变以及平卧运动的影响会对数据产生影响。虽然 MRI 测量无辐射且精确度较高,但受试者需要长时间保持同一体位不能活动,且多次扫描造成巨大的工作量以及过高的费用都限制了其应用。

现在有一个新的趋势就是将 X 线平片与 CT 及 MRI 结合应用。Aiyangar 等<sup>[9]</sup>利用 CT 三维重建建立受试者的腰椎模型,然后利用高速动态立体 X 线摄影获得受试者脊柱活动的数据,将 X 线数据叠加到腰椎三维模型上来分析腰椎动态活动的各项参数。此方法虽然仍然不能避免 X 线以及 CT 辐射量大的及操作较复杂的问题,但是却可以在大幅度提高精

准确度情况下进行脊柱运动的测量。Miao 等<sup>[10]</sup>使用类似的方法叠加双平面 X 线数据和 MRI 三维重建模型,用于测量 L<sub>4</sub> 椎体退变引起的腰椎活动改变。白剑强等<sup>[11]</sup>采用双 X 线透视影像系统和 MRI 相结合技术,在计算机辅助下,从受试者腰椎 MRI 获取每一节段腰椎三维重建模型,匹配到由双平面 X 线捕获的不同活动体位时腰椎双斜位 X 线透视图像上,真实重现生理载荷下腰椎椎体间三维运动状态,以此来分析正常受试者在生理载荷下活动时腰椎椎弓根螺钉入钉点的运动范围。此方法消除了一部分辐射,且受试者是在生理负荷下接受测试,且相比于只用 MRI 三维重建来测量能大幅度削减费用,但是 MRI 三维重建仍然需要较长时间保持体位。

### 3.2 传感器法

随着科学技术的发展,各类微型传感器相继问世,这给此类传感器应用与人体脊柱运动的测量提供了技术基础。此类传感器主要由微型加速度计、陀螺仪、重力感应计及磁强计中的一种或几种组成,能够贴附于人体表面并提供人体的活动数据。Law 等<sup>[12]</sup>对微型角度测量仪进行了横断面可靠性分析,角度测量仪在测量无症状自愿者及有颈部疼痛的患者时都表现出良好的可靠性。Lee 等<sup>[13]</sup>利用集成了重力感应仪及磁强计的传感器对 19 例年轻自愿者的颈椎进行三维运动分析,将传感器贴附于头部及胸廓,传感器能记录并输出运动数据,表现出了优异的准确性和可靠性。传感器测量方法具有无创、可靠及精确的优点,而且随着无线传输技术的飞速进展,还将能做到实时传输及实时显示<sup>[13]</sup>。同时配备有此类传感器的智能手机的普及也为脊柱运动测量普及提供了可能。Tousignant-Laflamme 等<sup>[14]</sup>使用 iPhone 手机配合相关软件测量健康受试者颈椎活动度,受试者采取坐位,测试者将手机用手固定于受试者头顶,受试者做各方向运动,测量各方向的活动范围。但采用此方法能基本满足一般测量需要,但会存在较大的测量者间误差,推广应用还需要更为规范的使用方法标准及流程。国内采用此方法的研究主要集中在颈椎的测量仪器的研发,主要思路都是在可以让受试者固定佩戴的头盔上安装角度仪以及罗盘等传感器来测量颈椎的活动度,并对其准确性和可靠性进行了验证,测量数据准确且可靠<sup>[15-17]</sup>,但是这类方法测量时需要固定胸廓以避免胸廓移动带来的误差,对于受试者自由运动有较大的影响。

### 3.3 体表标记法

将超声波标记、主动或被动红外标记和磁性标记点按一定标准贴于体表(主要贴附于体表解剖标志点),然后使用多个接收器来接收他们的信号,并

根据时间差或者信号强度计算出每个标记点在空间中的位置并相对于事先标定好的大地坐标系给出坐标。利用这些坐标数据就可以使用欧拉角重建或者其他数学工具来重现脊柱的运动状态并分析运动数据。超声波法曾被认为较高的可重复性和可靠性,但是 Fölsch 等<sup>[18]</sup>利用超声波测量法对受试者颈椎活动进行重复测试,间隔为 24 h,静止时测量角度比较精确且可重性好,屈伸运动时所得角度数据误差较大,且可重复性较差。所以该方法还有待验证,同时超声波较容易受到干扰及遮挡。Gelalis 等<sup>[19]</sup>利用颈椎活动对电磁标记法进行了可靠性验证,把该方法得出的角度数据与电子测角仪的数据进行比较,得出该方法是可靠且可被用于临床及科学研究。红外标记就是通过标记点反射红外线经红外摄像机接受,或者发光二极管主动发射红外线经红外线接收器接受,将信息输入软件后得出标记点坐标系。体表标记法精确度高,可达 0.5°和 0.1 mm,其安全可靠,无创无辐射,并且可以在软件实时显示运动状态,便于检测采集数据的完整性。但是此类方法也有局限性,比如都容易受到遮挡而丢失标记点数据,还有超声波法检测距离短,红外法容易受其他灯光的影响,电磁标记易受其他磁场的影响等,但是体表标记法将是脊柱在体动态测量的一种趋势,相关缺点得到改进后将会有相当广阔的应用前景。

### 3.4 光栅测量法

光栅测量法是将条纹光线形成的光栅投射到受试者背部,捕捉由于背部形变导致的光栅形变及明暗变化,从而计算出脊柱运动的数据的方法。该方法在脊柱变形性疾病的普查及诊断上有广泛的应用。赵文成等<sup>[20]</sup>利用两个光栅及点光源结合莫尔条纹法来测定人体腰椎后关节位移量。近年来该方法有了长足的进步,类似 Diers 这类仪器已经高度集成化,光栅投射及扫描都集成于同一部件,并且有完善人体模型及计算方法来快速给出测量结果。Mangone 等<sup>[21]</sup>将光栅立体影像法与 X 线法进行比较,测量青少年特发性脊柱侧凸患者,以 Cobb 角为评价指标,来检验光栅立体影像法与 X 线方法的相关性,两种方法显示出很高的相关性。这种无创且简便的方法可以广泛应用于青少年特发性脊柱侧凸这一类脊柱畸形的筛查及监测,但设备价格高昂以及所采用人体模型对各人种的匹配问题仍然限制了其应用。

## 4 脊柱活动范围的离体测量

脊柱的活动范围的离体测量一直是人体生物力学的研究重点。虽然脊柱在去除大部分软组织如肌肉和韧带后,或者经防腐处理后,生物力学特点与在体脊柱相比有很大的改变,但是离体脊柱的测量对

于脊柱运动以及各种植入物如人工椎间盘和人工椎体等的前期研究评价有着不可替代的作用。由于手动扭转脊柱测量活动范围及活动特点,有不可重复性及随意性大的确定,已很少运用,替代方法为将脊柱固定于专门的试验台的机械臂之间,施加恒定的扭转力矩,可以很好地保证每次运动都是在相同的条件下进行的。同时很多在体脊柱测量方法也同样适用于离体脊柱的测量。

#### 4.1 传感器测量

电子传感器不仅应用于在体脊柱测量,而且能应用于离体脊柱运动测量,但是其中集成传感器有所区别,主要为线位移传感器、角度传感器及角加速度传感器等。但是传感器的安置与在体测量有明显区别,由于是脊柱节段固定于试验台之上,故不能在体测量那样安置于这一节段的两端从而计算运动范围,而需要贴附于所测椎体上,同时需要将运动方向与测量方向统一从而避免测量误差,同时脊柱的运动是耦合运动,故运动方向会有所改变,所以不能始终保持运动方向与测量方向的统一,其可重复性及可靠性差,故不能满足现今要求测量快速、准确及可靠的要求。

#### 4.2 影像学测量法

一般影像学方法有 X 线片和 CT 法。X 线方法是在离体脊柱的椎骨上贴附显影标记,然后拍摄正侧位及上下位片来取得标记点的空间位置变化数据,将数据输入计算机经计算后反映椎骨的空间位置变化。CT 主要有两种,第一种是将标本置于动态 CT 进行扫描,所得数据输入计算机从而计算出旋转的角度,Zuhlke 等<sup>[22]</sup>利用动态 CT 测量离体腰椎标本的旋转活动度,将扫描数据输入软件并分析计算得出各平面的旋转活动度但这种方法为二维方法,缺乏必要的精确度且不能反映脊柱的三维运动;第二种是将标本的极限运动位置及中立位进行扫描并三维重建,然后应用欧拉角等来分析相邻椎体的运动,此方法虽然是三维方法,但是离体标本在架次扫描时容易移位,坐标系难以重合,且标记点是手动选取有较大的随机性。此类方法已不能满足现今需求。

#### 4.3 光学测量法

一种离体光学测量,利用两个相互垂直的光学测量平面构成测量系统,记录在此系统中脊柱标本表面所贴附的标记点的坐标数据,运用计算机软件对所记录的坐标数据进行分析并得出三维坐标,从而模拟其空间位置。上世纪 Panjabi 等<sup>[23]</sup>曾研制了此类设备,利用两台照相机交叉拍摄颈椎标本上的运动标记,然后分析脊柱运动。国内黄文华等<sup>[24]</sup>也有相似的方法进行颈椎活动的研究。此方法虽然可以进

行三维运动测量,其精确度高,但是这类设备没有量产,自行建造成本较大,运用技术门槛较高;而且需要熟练的人员来操作以及分析数据,故现今已很少运用。

利用光学测量比较新的方式是采用激光扫描方法,摄像头捕捉投射于身体或是脊柱标本表面的放射光,根据放射光的位置、时间间隔以及光轴角度等数据,经计算机计算并模拟得出脊柱表面的数据。Heuer 等<sup>[25]</sup>利用一种新型的激光扫描测量系统测量随和切除后椎间盘三维位移的变化情况,扫描速度快,但是测量部分椎间盘的位移变化。激光扫描能够快速获取脊柱标本表面的大量数据,精确度较高,可达 0.01 mm,如果使用专业数据集图像处理软件进行重建能够很好的重现标本。但是激光扫描最佳的应用目标是硬质标本,如骨性脊柱标本,但是无法重建被动运动中被变形软组织覆盖的脊柱标本,而且此类设备及其配套的相关图像处理软件价格高昂。

#### 4.4 光电测量法

这类测量方法与前文中在体脊柱测量中体表标记法所使用的是相同的设备,只是这个方法中是把硬质卡片固定在椎体上,而标记点贴在硬质卡片上。Cai 等<sup>[26]</sup>将颈椎模型固定在旋转力台上,测试在不同扭转力矩下寰枢关节的旋转范围。此方法现在配合欧拉角来计算颈椎活动度,不需要求解瞬时及平均旋转中心。这类方法测量精度高,能够同时测量多个节段或者整个节段,现在有此类设备集成度较高,能提供完整的数据采集及分析方案,但是价格较高,如果有良好的数学基础就可以将原始数据输入 Matlab 进行分析,从而能减少不少成本。

### 5 旋转中心的测量

旋转中心的测量有较多的方法,但是瞬时旋转中心(instant center of rotation, ICR)也称为瞬时刻轴(instant axis of rotation),主要使用能够动态测量的方法,以获取尽可能详细的不断变化的旋转中心点的分布情况。虽然三维脊柱运动测量方式的日渐普及以及欧拉角的运用,使得计算脊柱运动的范围可以避免计算旋转中心,但是并不能忽视旋转中心的价值,脊柱的运动范围是评价脊柱运动的定量指标,而旋转中心是评价脊柱运动的定性指标,反映的是脊柱运动的质量,而有些如退行性脊柱病变可能先出现旋转中心的改变,而后才出现运动范围的改变。现在对于旋转中心的研究也分为离体研究与在体研究。

Sengupta 等<sup>[27]</sup>使用 10 具腰椎标本在实验平台上做 6 个自由度的运动,并动态的记录了腰椎标本上标记点的位置信息,输入相应程序后计算出各运

动方向上旋转轴的偏移量,他们第 1 次发布了 L<sub>4,5</sub> 椎体间的连续运动中瞬时旋转轴的偏移量,屈伸及侧屈运动时旋转轴随运动方向偏移,屈伸运动的偏移量为 26.5 mm,侧屈运动的偏移量为 15.35 mm,旋转时旋转轴轨迹是一个以椎体中心为中心的半圆弧。但是研究者也提出这一研究虽然很精确,但是不适用于在体脊柱的研究。

Anderst 等<sup>[28]</sup>利用双平面 X 线,对 20 例无症状自愿者以及 12 例 C<sub>5,6</sub> 椎体融合以及 5 例 C<sub>6,7</sub> 融合患者进行对比研究,最后得出结论人工椎间盘置换术需考虑不同节段旋转中心的改变,同时单节段的前路脊椎融合术对颈椎的屈伸运动无明显影响。国内,夏群等<sup>[29]</sup>结合双平面 X 线及 MRI 检查技术,计算出生理负荷状态下的腰椎椎体间旋转中心, L<sub>2,3</sub>、L<sub>3,4</sub> 椎体间正中矢状面屈伸运动的中心位于椎体中后 1/3 处,而横断面上左右旋转时的中心位于椎体前方 30 mm 处。

脊柱旋转中心的研究对于早期脊柱不稳定疾病具有重要意义,同时对于人工脊柱替代物(人工椎间盘、人工椎体、人工寰枢关节等)等设计制造具有更为重要的意义。但是在脊柱的运动是一个三维的复杂耦合运动,对于脊柱旋转中心的研究目前还仅局限于单一方向或平面内,还需进一步进行三维空间内研究。同时,目前离体脊柱模拟生理运动后得出的平均旋转中心与在体脊柱的平均旋转中心有多大差异还需进一步论证,就像前文 Sengupta 等<sup>[27]</sup>虽然能精确地测量并计算离体脊柱的旋转中心,但是也提出此方法不适用于在体脊柱的测量。

## 6 展望

脊柱的生物力学分析仍然存在着许多困难和难题,由于脊柱多节段构成以及单节段耦合运动的复杂性,使得脊柱的三维测量需要更为精确以及可靠的测量手段以及计算方法。随着科学技术的发展,计算机技术以及半导体技术的发展,以前看似不可能的方法都正在逐步实现,随着软件的日渐完善,有些方法被结合起来,避免各自的缺点的同时增强测量的准确性以及可靠性。在方法日趋多样化的今天,我们可以根据不同的需求选择合适的方法,但是三维动态测量及计算将是接下来脊柱运动测量分析领域的主流研究,相关的三维测量评价标准还有待建立及完善。随着更多的新技术、新方法以及新的创意的涌现,在体脊柱运动的测量将会更加准确及可靠,离体脊柱的测量也会有更多突破性的进展。

### 参考文献

[1] 季伟,王向阳. 人体脊柱运动测量方法研究进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(1): 92-96.  
Ji W, Wang XY. Advances in measuring methods for human spinal

movement[J]. Yi Yong Sheng Wu Li Xue, 2011, 26(1): 92-96. Chinese.

[2] 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.

[3] Amevo B, Worth D, Bogduk N. Instantaneous axes of rotation of the typical cervical motion segments: a study in normal volunteers[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 1991, 6(2): 111-117.

[4] Euler L. A general investigation into the mortality and multiplication of the human species[J]. Theor Popul Biol, 1970, 1(3): 307-314.

[5] Nizard RS, Wybier M, Laredo JD. Radiologic assessment of lumbar intervertebral instability and degenerative spondylolisthesis[J]. Radiol Clin North Am, 2001, 39(1): 55-71, v-vi.

[6] Zheng G, Nolte LP, Ferguson SJ. Scaled, patient-specific 3D vertebral model reconstruction based on 2D lateral fluoroscopy[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2011, 6(3): 351-366.

[7] Salem W, Lenders C, Mathieu J, et al. In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during maximal axial rotation[J]. Man Ther, 2013, 18(4): 339-344.

[8] 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.

[9] Aiyangar AK, Zheng L, 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.

[10] Miao J, Wang S, Wan Z, et al. Motion characteristics of the vertebral segments with lumbar degenerative spondylolisthesis in elderly patients[J]. Eur Spine J, 2013, 22(2): 425-431.

[11] 白剑强, 夏群, 阎广辉. 腰椎椎弓根在体相对运动轨迹的研究[J]. 中华骨科杂志, 2011, 31(5): 424-430.  
Bai JQ, Xia Q, Yan GH. Range of motion of lumbar pedicle screw entrance point under physiological weight bearing[J]. Zhonghua Gu Ke Za Zhi, 2011, 31(5): 424-430. Chinese.

[12] Law EY, Chiu TT. Measurement of cervical range of motion (CROM) by electronic CROM goniometer: a test of reliability and validity[J]. J Back Musculoskelet Rehabil, 2013, 26(2): 141-148.

[13] Lee RY, Laprade J, Fung EH. A real-time gyroscopic system for three-dimensional measurement of lumbar spine motion[J]. Med Eng Phys, 2003, 25(10): 817-824.

[14] Tousignant-Laflamme Y, Boutin N, Dion AM, et al. Reliability and criterion validity of two applications of the iPhone™ to measure cervical range of motion in healthy participants[J]. J Neuroeng Rehabil, 2013, 10(1): 69.

[15] 李旭, 池永龙. 一种新的颈椎活动度测量方法及其可行性研究[J]. 浙江创伤外科, 2008, (5): 394-396.  
Li X, Chi YL. A new method for measuring the activity of the cervical spine and the feasibility study[J]. Zhe Jiang Chuang Shang Wai Ke, 2008, (5): 394-396. Chinese.

[16] 吴晓东, 袁文, 汤俊君, 等. 颈椎三维活动度测定仪的测量稳定性评估[J]. 脊柱外科杂志, 2009, (4): 205-208.  
Wu XD, Yuan W, Tang JJ, et al. Evaluation for the stability of 3D cervical range of motion inclinometer[J]. Ji Zhu Wai Ke Za Zhi, 2009, (4): 205-208. Chinese.

[17] 朱立国, 甄朋超, 于杰, 等. 头盔式颈椎活动度测量仪的临床应

- 用评析[J]. 北京中医药, 2010, 29(6): 412-424.
- Zhu LG, Zhen PC, Yu J, et al. Analysis of clinical application of the helmet measuring method of cervical spine motion[J]. Bei Jing Zhong Yi Yao, 2010, 29(6): 412-414. Chinese.
- [18] Fölsch C, Schlögel S, Lakemeier S, et al. Test-retest reliability of 3D ultrasound measurements of the thoracic spine[J]. PM R, 2012, 4(5): 335-341.
- [19] Gelalis ID, DeFrate LE, Stafilas KS, et al. Three-dimensional analysis of cervical spine motion; reliability of a computer assisted magnetic tracking device compared to inclinometer[J]. Eur Spine J, 2009, 18(2): 276-281.
- [20] 赵文成, 王家鄞, 侯筱魁, 等. 应用莫尔条纹法测定人体腰椎后关节三维位移量[J]. 上海机械学院学报, 1990, 12: 25.
- Zhao WC, Wang JJ, Hou XK. Using moore stripes to measuring the motiong of the posterior joint of lumbar spine[J]. Shang Hai Ji Xie Xue Yuan Xue Bao, 1990, 12: 25. Chinese.
- [21] Mangone M, Raimondi P, Paoloni M, et al. Vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis calculated by radiograph and back surface analysis-based methods; correlation between the Raimondi method and rasterstereography[J]. Eur Spine J, 2013, 22(2): 367-371.
- [22] 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): E215-218.
- [23] Panjabi MM, Duranceau JS, Oxland TR, et al. Multidirectional instabilities of traumatic cervical spine injuries in a porcine model [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1989, 14(10): 1111-1115.
- [24] 黄文华, 朱青安, 钟世镇, 等. 脊柱三维运动定位的计算机视觉方法[J]. 计算机应用, 2000, S1.
- Huang WH, Zhu QA, Zhong SZ, et al. Computer vision method to locate the three-dimensional motion of the spine[J]. Ji Suan Ji Ying Yong, 2000, S1. Chinese.
- [25] 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 (Bristol, Avon), 2008, 23(3): 260-269.
- [26] 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.
- [27] Sengupta DK, Demetropoulos CK, Herkowitz HN. Instant axis of rotation of L<sub>4-5</sub> motion segment--a biomechanical study on cadaver lumbar spine[J]. J Indian Med Assoc, 2011, 109(6): 389-390, 392-393, 395.
- [28] Anderst WJ, Donaldson WF 3rd, Lee JY, et al. Cervical motion segment percent contributions to flexion-extension during continuous functional movement in control subjects and arthrodesis patients[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2013, 38(9): E533-539.
- [29] 夏群, Wang SB, Li GA, 等. 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.
- Xia Q, Wang SB, Li GA, et al. In-rive study of rotational characteristic of human lumbar segments[J]. Zhonghua Gu Ke Za Zhi, 2010, 30(4): 325-329. Chinese.

(收稿日期: 2014-06-20 本文编辑: 王玉蔓)

·读者·作者·编者·

## 《中国骨伤》杂志正式启用稿件远程处理系统通知

《中国骨伤》杂志已于 2010 年 1 月正式启用稿件远程处理系统。通过网站 <http://www.zggszz.com> 可实现不限时在线投稿、审稿、编辑、退修、查询等工作。本刊不再接受纸质版和电子信箱的投稿。

欢迎广大的作者、读者和编者登录本刊网站, 进入稿件处理系统进行网上投稿、审稿和稿件查询等工作。

咨询电话: 010-84020925。

《中国骨伤》杂志社