

临床论著

人体全长 X 线片的构建及其评价整体矢状面平衡的可靠性和准确性

李鹏志, 王 冰, 吕国华, 李亚伟, 李 磊, 戴瑜亮, 卿亚龙, 吴鹏飞, 徐洁涛

(中南大学湘雅二医院脊柱外科 410011 湖南省长沙市)

【摘要】目的:应用数字化 X 线摄影(digital radiography, DR)系统构建新型人体全长 X 线片,并分析其评价人体整体矢状面平衡的可靠性和准确性。**方法:**2018 年 10 月~2019 年 10 月,采用 DR 系统对 30 例志愿患者一次性连续曝光采集影像数据,运用医学图像处理软件全自动拼接获取人体全长 X 线片,其中男 13 例,女 17 例,年龄 45~65 岁(56.5 ± 6.1 岁)。同时接受全脊柱和下肢 X 线片检查。利用 Surgimap 软件由两名脊柱外科医师和一名影像科医师分别在人体矢状面全长 X 线片、全脊柱和下肢侧位 X 线片上分别独立测量:胸椎后凸角(thoracic kyphosis, TK)、腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL)、骨盆入射角(pelvic incidence, PI)、骨盆倾斜角(pelvic tilt, PT)、骶骨倾斜角(sacral slope, SS)、矢状面垂直轴偏距(sagittal vertical axis, SVA)、骶股角(sacrofemoral angle, KFA)、膝关节角(knee angle, KA)、踝关节角(ankle angle, AA)、骨盆位移(pelvic shift, P.Shift)。通过独立样本 *t* 检验验证相关参数在不同摄片方式中的一致性,通过组内相关系数(ICC)分析观察者内以及观察者间参数值的一致性。**结果:**人体矢状面全长 X 线片与全脊柱和下肢侧位 X 线片上测量的脊柱-骨盆-下肢参数比较的 *P* 值为 0.782~0.969,均无统计学差异,具有一致性。人体矢状面全长 X 线片测量的 TK、LL、PI、PT、SS、SVA 值与全脊柱侧位 X 线片上测量值的观察者内 ICCs 分别为 0.696~0.857、0.724~0.873、0.672~0.943、0.691~0.851、0.648~0.852、0.645~0.867;观察者间的 ICCs 为 0.678~0.822、0.704~0.872、0.772~0.904、0.763~0.936、0.665~0.824、0.541~0.665;人体矢状面全长 X 线片上测量的 PI、PT、SS、KFA、KA、AA、P.shift 值与下肢侧位 X 线片上测量值的观察者内 ICCs 分别为 0.673~0.932、0.623~0.828、0.634~0.861、0.701~0.873、0.645~0.867、0.679~0.855、0.592~0.827;观察者间的 ICCs 为 0.665~0.914、0.631~0.811、0.625~0.843、0.541~0.765、0.591~0.753、0.613~0.798、0.543~0.762。**结论:**采用 DR 系统一次性连续曝光成像构建人体全长 X 线片可行,脊柱-骨盆-下肢矢状面参数与全脊柱和下肢侧位 X 线片上测量结果一致率高,且具有良好的可靠性和准确性。

【关键词】人体全长 X 线片;矢状面平衡;脊柱-骨盆-下肢矢状面参数;可靠性;准确性

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.08.07

中图分类号:R816 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2020)-08-0710-08

The establishment of full body splicing radiograph and study on its accuracy and reliability of global sagittal balance/LI Pengzhi, WANG Bing, LÜ Guohua, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30(8): 710-717

【Abstract】Objectives: To construct a new full body splicing radiograph through digital radiography(DR) system, and to discuss the reliability and accuracy in its evaluation of overall sagittal balance. **Methods:** From October 2018 to October 2019, the DR system was applied to collect the image data of 30 volunteers at one time continuous exposure, and the medical image processing software was used to automatically stitch together and obtain clear and accurate full body splicing radiograph. There were 13 men and 17 women with an age of 45-65 years (mean age 56.5 ± 6.1 years). The volunteers were also subjected to an examination of whole spine lateral radiographic and lateral scanogram of the normal DR radiography system. The parameters of thoracic kyphosis(TK), lumbar lordosis(LL), pelvic incidence(PI), pelvic tilt(PT), sacral slope(SS), sagittal vertical axis(SVA), sacrofemoral angle(KFA), knee flexion angle(KA), ankle angle(AA), and pelvic shift(P.shift) were mea-

基金项目:国家自然科学基金面上项目(81871748);国家自然科学基金青年项目(81601868)

第一作者简介:男(1987-),博士研究生在读,研究方向:脊柱外科

电话:(0731)85295125 E-mail:spine_lipengzhi@126.com

通讯作者:王冰 E-mail:bingwang20021972@aliyun.com

sured. Two spine surgeons and an imaging physician performed imaging measurements by using Surgimap software at three different occasions. The correlation coefficients were validated by independent sample *t*-test. The consistency of parameter values within and between the observers was analyzed by the intragroup correlation coefficient (ICC). **Results:** The independent sample *t*-test of the full-body sagittal splicing radiograph and the whole spine radiograph and lower limbs extremity had no statistical difference (independent sample *t*-test, 0.782–0.969 $P>0.05$). The full-body sagittal splicing radiograph was compared to the whole-spine lateral radiograph, and the intraobserver ICCs of TK, LL, PI, PT, SS, SVA were 0.696–0.857, 0.724–0.873, 0.672–0.943, 0.691–0.851, 0.648–0.852, and 0.645–0.867, respectively. The interobserver correlation coefficients were 0.678–0.822, 0.704–0.872, 0.772–0.904, 0.763–0.936, 0.665–0.824, and 0.541–0.665. The full-body sagittal splicing radiograph was compared to the lateral scanogram, and the intraobserver ICCs of PI, PT, SS, KFA, KA, AA, and P.shift were 0.673–0.932, 0.623–0.828, 0.634–0.861, 0.701–0.873, 0.645–0.867, 0.679–0.855, and 0.592–0.827, respectively. The interobserver correlation coefficients were 0.665–0.914, 0.631–0.811, 0.625–0.843, 0.541–0.765, 0.591–0.753, 0.613–0.798, and 0.543–0.762. Intraobserver and interobserver reproducibility for both modalities were good to excellent. **Conclusions:** It is feasible to construct the full body splicing radiograph by digital radiography system. The sagittal parameters of the spine–pelvis–lower extremity measured by it are similar to the measurement results on the whole-spine lateral radiograph and the lateral scanogram, and have good reliability and repeatability.

【Key words】 Full-body splicing radiograph; Global sagittal balance; Pelvic sagittal parameters; Reproducibility of results

【Author's address】 Spine Surgery, the Second Xiangya Hospital, Central South University, Changsha, 410008, China

脊柱–骨盆矢状面平衡状况关系到脊柱疾病患者临床症状的发生和术后生活质量的改善^[1], 目前已经成为业内关注与研究的热点。从整体上看, 站立位时人体是一个开放的运动链, 矢状面平衡被阐释为从脊柱延伸到骨盆以及下肢的各个力线的矢量和^[2,3]。因而, 平衡分析应该包括脊柱、骨盆以及下肢的力线。但由于下肢在传统影像学中的视觉局限性, 既往研究中也缺乏对下肢力线分析。2012 年, Wybier 等^[4]介绍了法国 EOS imaging 公司的 X 线影像采集系统 (EOS imaging System, Paris, France), 该成像设备可以一次性获得站立位脊柱和下肢全长像, 且辐射剂量较低, 整体力线分析可以扩展到髋关节和股骨以下, 从而为全身力线的整体分析开辟了新视角。然而, 高昂的成本极大地限制了 EOS 系统的应用和推广。2018 年, Jeon 等^[5]介绍了在数字化 X 线摄影 (digital radiography, DR) 系统摄片、组合应用全脊柱侧位 X 线片和下肢侧位 X 线片的技术, 证明了这两种图像在脊柱–骨盆参数方面测量结果的一致性, 为分析人体矢状面整体问题提供了一种简便方法与研究方向。但该技术仍然需要两次成像, 对于部分严重矢状面失衡及伴有严重髋膝关节病变患者而言, 在两次拍摄过程中可能会因为疲劳出现体位

改变, 导致测量结果出现误差, 影响真实结果。其次, 由于 X 线投照中心不同, 部分患者的骨盆结构, 尤其是骶骨上终板在下肢全长 X 线片中无法显示, 导致无法与脊柱全长像进行对比研究。如何确定合适的投射角度、距离以及照射条件, 以获得清晰可靠的图像, 还需进一步研究。我们通过 DR 系统摄片一次性采集影像数据, 后期应用拼接软件成功构建人体全长 X 线片, 本研究分析其在评价整体矢状面平衡的可靠性和准确性, 旨在使其部分替代 EOS 系统成为一种更为经济、普及的方式。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2018 年 10 月~2019 年 10 月, 30 例志愿患者同时接受了人体全长 X 线片正侧位片、全脊柱正侧位片和下肢正侧位片拍摄。年龄 45~65 岁 (56.5 ± 6.1 岁), 体重指数 (BMI) $21.3\sim34.2\text{kg/m}^2$ ($28.5\pm4.3\text{kg/m}^2$)。研究对象为脊柱门诊患者, 纳入标准: (1) 年龄 >18 岁; (2) 自然站立姿态可保持 5min 以上; (3) 自愿接受人体全长 X 线片摄片及全脊柱片和下肢 X 线片检查; 排除标准: (1) 有脊柱或下肢内固定手术史; (2) 罹患脊柱或下肢肿

瘤、感染等影响影像测量的疾患;(3)有精神疾病或无法完成配合。本研究获得医院伦理委员会批准。

1.2 影像学摄片

X 线片(包括全长片、全脊柱片及下肢片)拍摄站姿要求如图 1 所示。正位片:患者直立以自然姿势站立,两眼向前方平视,两下肢并拢,足尖向前,两上肢下垂至躯干两侧;侧位片:患者直立以自然姿势站立,眼睛平视前方,身体无外在支撑物且右侧紧贴全脊柱摄影架,双脚分开与肩同宽,双肩放松,双臂屈肘与身体中垂线呈 30° 举于胸前,手腕放松,每一个指尖都并拢置于同侧锁骨上窝中。

摄片系统采用我院直接数字化透视摄影



图 1 X 线片拍摄站姿 a 正位片:患者直立以自然姿势站立,两眼向前方平视,两下肢并拢,足尖向前,两上肢下垂至躯干两侧 b 侧位片:患者直立以自然姿势站立,眼睛平视前方,身体无外在支撑物且右侧紧贴全脊柱摄影架。双脚分开与肩同宽,双肩放松,双臂屈肘与身体中垂线呈 30° 举于胸前,手腕放松,每一个指尖都并拢置于同侧锁骨上窝中

Figure 1 X-ray shooting position requirements a Upright position: The patient stands upright in a natural posture, with two eyes looking straight ahead, two lower limbs close together, toes forward, two upper limbs hanging down to both sides of the trunk b Lateral position: The patient stands upright in a natural posture, the eyes look straight ahead, the body has no external supports and the right side clings to the full spine photography frame. The feet should be the same width as the shoulders, the shoulders should be relaxed, the elbows should be bent at 30° with the vertical line of the body in front of the chest, and the wrist should be relaxed. Each fingertip should be placed in the supraclavicular fossa

Definium 6000 系统(美国 GE 公司),使用数字平板探测器和图像拼接系统[包括 X 射线管(MX100)、发生器(JEDI 80 RD 1T)和数字平板探测器(“5340000-7”)]。选取高质量模式(high quality,HQ)进行摄片,靶片距离 1.8m。应用自动曝光控制(automatic exposure control,AEC),曝光视野 25×41cm;曝光条件 90~110kV、320/400mA、5.0/6.0mAs。透视下分别定好曝光起点和终点,在 X 线球管曝光时将束光器的宽度限定在 40mm 范围以保证 X 线束接近平行,以接近垂直的方向均匀照射于人体。曝光时 X 线球管与 IP 板沿摄影架纵轴同步、均匀移动。通过利用 X 射线管的自动跟踪运动,1 次连续几秒的曝光后获得相应节段的影像序列。将影像序列在后期应用影像工作站通过数字断层融合技术进行全自动无缝拼接处理。无缝拼接条件:曝光槽宽度 40mm;重叠宽度 20mm;基本高度 140mm;中心偏移度 2.2mm;帧数范围 1~35;最小尺寸 1400mm。使用专用软件(Crealife Anythink)在影像工作站上拼接图像,并将合并的图像发送到图片存档和通信系统工作站(picture archiving and communication systems,PACS)。所有图像由医学图像处理软件全自动编辑。

1.3 影像学测量

将所有 X 线片原始数据导入 Surgimap 软件,对所有纳入本研究的病例在人体全长侧位 X 线片和全脊柱/下肢侧位 X 线片上测量脊柱-骨盆-下肢矢状位参数,测量参数包括:胸椎后凸角(thoracic kyphosis,TK)、腰椎前凸角(lumbar lordosis,LL)、骨盆入射角(pelvic incidence,PI)、骨盆倾斜角(pelvic tilt,PT)、骶骨倾斜角(sacral slop,SS)、矢状面垂直轴偏距(sagittal vertical axis,SVA)、骶股角(sacrofemoral angle,KFA)、膝关节角(knee angle,KA)、踝关节角(ankle angle,AA)、骨盆位移(pelvic shift,P.shift)(图 2)。影像学测量由两名脊柱外科医师和一名影像科医师分别独立进行,每位医师同一类型同一指标测量两次,取平均值。

1.4 统计学方法

统计分析应用 SPSS 22.0 软件(Chicago, IL, USA),影像测量指标各项数据均以均值±标准差表示,人体全长侧位片与全脊柱侧位片/下肢侧位片间的比较采用 3 位医师测量结果的平均值行独

立样本 t 检验, $P < 0.05$ 为有统计学意义。每位医师同一指标不同类型测量值之间的一致性和三位医师测量值之间的可重复性, 均应用组内相关系数 (intraclass correlation efficient, ICC) 进行评估, 分别以 ICC 值 < 0.40 、 $0.40 \sim 0.59$ 、 $0.60 \sim 0.74$ 和 $0.75 \sim 1.00$ 定为差、一般、好、优。

2 结果

2.1 人体全长 X 线片的构建

对 30 例志愿者的人体全长 X 线片处理后打印, 可见人体矢状面从颅骨到足踝同时在 1 张 X 线片上清晰显示, 基本达到了人体全长连续成像一次性无缝拼接的效果 (图 3a)。其中 2 例出现 C7 椎体及上胸段显示不清晰, 未达到测量要求, 均重新采集图像。构建的人体全长 X 线片图像符合以下几点: (1) 头颅、脊柱、骨盆、下肢长度符合正常身材比例; (2) 颈、胸、腰、骶椎体数目符合一次成像的椎体数目; (3) 颅骨、上下肢长骨、椎体边缘完整, 形态规则, 无变形; (4) 图像没有明显接缝, 骨形态连续完整, 整张图像密度均匀。

2.2 人体矢状面全长 X 线片的有效性分析

在人体矢状面全长 X 线片以及全脊柱侧位 X 线片、下肢侧位 X 线片上测量的脊柱-骨盆-下肢参数见表 1、2。人体矢状面全长 X 线片与全脊柱和下肢侧位 X 线片上测量参数比较的 P 值为 $0.782 \sim 0.969$, 无统计学差异。说明在构建的人体矢状面全长 X 线片测量的参数与在全脊柱和下肢侧位 X 线片测量的参数具有一致性。

2.3 人体矢状面全长 X 线片的可重复性分析

人体矢状面全长 X 线片与全脊柱、下肢侧位 X 线片上测量的参数观察者内和观察者间的可重复性见图 4。TK、LL、PI、PT、SS、SVA 值的观察者内 ICCs 分别为 $0.696 \sim 0.857$ 、 $0.724 \sim 0.873$ 、 $0.672 \sim 0.943$ 、 $0.691 \sim 0.851$ 、 $0.648 \sim 0.852$ 、 $0.645 \sim 0.867$, 观察者间的 ICCs 为 $0.678 \sim 0.822$ 、 $0.704 \sim 0.872$ 、 $0.772 \sim 0.904$ 、 $0.763 \sim 0.936$ 、 $0.665 \sim 0.824$ 、 $0.541 \sim 0.665$, 显示了人体矢状面全长片和全脊柱侧位片相比, 同样具有很好的可重复性; PI、PT、SS、KFA、KA、AA、P.shift 值的观察者内 ICCs 分别为 $0.673 \sim 0.932$ 、 $0.623 \sim 0.828$ 、 $0.634 \sim 0.861$ 、 $0.701 \sim 0.873$ 、 $0.645 \sim 0.867$ 、 $0.679 \sim 0.855$ 、 $0.592 \sim 0.827$, 观察者间的 ICCs 分别为 $0.665 \sim 0.914$ 、 $0.631 \sim 0.811$ 、 $0.625 \sim 0.843$ 、 $0.541 \sim 0.765$ 、 $0.591 \sim 0.753$ 、 $0.613 \sim 0.798$ 、

$0.543 \sim 0.762$, 说明人体矢状面全长片和下肢侧位片相比, 同样具有很好的可重复性。

3 讨论

脊柱-骨盆矢状面平衡分析是评估各类脊柱疾患发生发展的基本手段^[6-10]。术前对人体矢状面平衡的准确评估有利于改善脊柱手术临床及影像学疗效^[11-13]。矢状面平衡被认为是从脊柱延伸至骨盆以及下肢各力线的矢量和, 既往研究认为腰椎、骨盆旋转式调节是矢状面平衡的重要机制^[14]。所有代偿机制都是为了维持人体矢状面的整体平衡。SVA 是关于躯干总体平衡的概念, 并且是腰椎前凸丢失的直接结果^[15]。大量文献证明, SVA 与脊柱退变性疾病患者的生活质量相关, SVA 绝对值越大, 患者生活质量越差^[16]。但 SVA 容易受到多种因素的影响, 如患者摄片时站立的姿势、手臂摆放的位置等, 都会影响到测量结果, 部分髋-脊综合征的患者, 站立位时双髋过伸及双膝屈曲代偿, 这可能会掩盖异常的 SVA, 而且这种线性指标测量误差较大^[17]。如矢状面失衡超过以上两种机制的代偿极限, 则需通过髋、膝关节屈曲进行代偿, 而髋、膝关节病变可影响脊柱-骨盆力线^[2, 18]。下肢的代偿功能主要依靠髋、膝关节的屈曲以及踝关节的过伸。KA、AA 和 P.shift 是量化其代偿能力的参数指标。由于骨盆-股骨的连接是骨盆的负重旋转轴, KA 可以量化膝关节对脊柱-骨盆畸形的代偿^[19]。因而, 矢状面平衡分析应该包括脊柱、骨盆以及下肢的力线, 需要在整体脊柱站立和放松状态下的前后侧位 X 线拍片, 并规范化标准检查站姿, 双手放在锁骨上^[20]。但由于既往摄片条件限制, 传统影像学摄片难以满足评价人体整体矢状面平衡的要求。

Lazennec 等^[21]认为 EOS 图像可为临床医生对全脊柱及双下肢功能位下平衡提供更为全面的理解, 即双下肢的评估不仅参与全脊柱代偿性平衡补偿, 也是影响全身平衡的重要独立参数之一。EOS 成像系统为人体整体平衡分析开辟了新的视角^[22], 提供了站姿、坐姿或蹲坐姿的高质量整体图像^[23, 24]。EOS 成像以真正 1:1 比例产生全身图像, 且不需要进行多图像再编辑及合成^[25], 除 2D 成像外, EOS 系统可获得 3D 成像及脊柱、骨盆和下肢的放射学参数。由于采用通过准直仪缝隙后获得的扇形光束来实现, 大大降低了放射剂量, 使

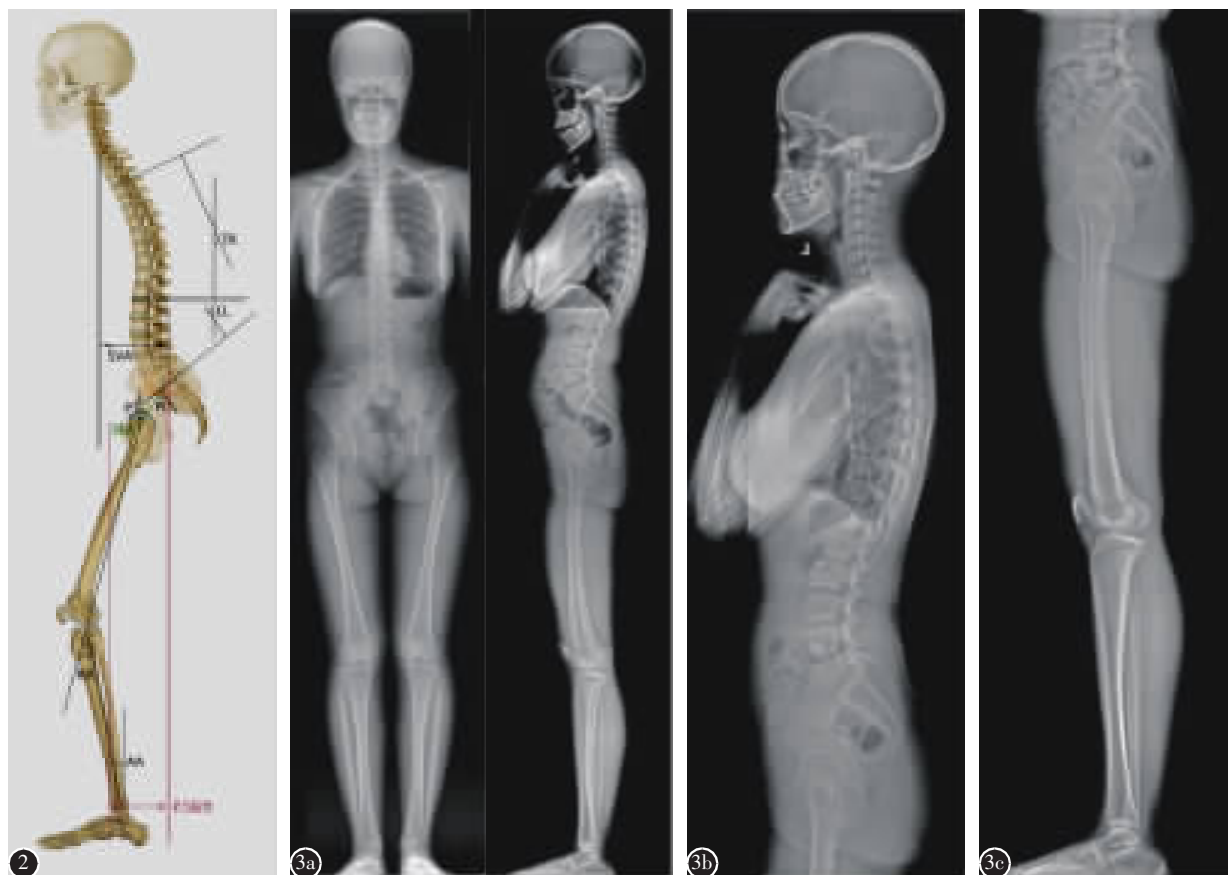


图 2 脊柱-骨盆-下肢矢状位参数测量示意图:胸椎后凸角(thoracic kyphosis,TK),T4 椎体上终板与 T12 椎体上终板之间的角度;腰椎前凸角(lumbar lordosis,LL),L1 椎体上终板与 S1 椎体上终板之间的角度;骨盆入射角(pelvic incidence,PI),S1 上缘中点至股骨头中心点连线与 S1 上缘中垂线的夹角;骨盆倾斜角(pelvic tilt,PT),S1 上缘中点至股骨头中心点连线与铅垂线的夹角;骶骨倾斜角(sacral slop,SS),S1 上缘与水平线的夹角;矢状面垂直轴偏距(sagittal vertical axis,SVA),C7 铅垂线至 S1 终板后上角的垂直距离;脊柱股骨角(spine femoral angle,KFA),S1 上缘中点至股骨中点连线与双股骨轴之间的夹角;膝关节角(knee angle,KA),股骨的机械轴与胫骨的机械轴之间的角度;踝关节角(ankle angle,AA),胫骨的机械轴与铅垂线的角度;骨盆位移(pelvic shift, P.shift),S1 终板后上角铅垂线至胫骨远端前皮质之间的垂直距离

图 3 46 岁女性患者,腰椎管狭窄症 **a** 人体全长 X 线片示 TK 44.5°、LL 42.2°、PI 54.8°、PT 15.5°、SS 39.4°、SVA 3.5cm、KFA 198.1°、KA 14.1°、AA 21.4°、P.shift 153.7mm **b** 全脊柱侧位 X 线片示 TK 39.3°、LL 39.1°、PI 57.9°、PT 17.7°、SS 40.2°、SVA 4.4cm **c** 下肢侧位 X 线片示 PI 57.6°、PT 15.4°、SS 42.1°、KFA 197.3°、KA 15.3°、AA 22.5°、P.shift 147.9mm

Figure 2 Schematic diagram of spinal-pelvic-lower limb parameter measurement. Thoracic kyphosis(TK) measured from T4-T12. Lumbar lordosis(LL) measured from L1-S1. Pelvic incidence(PI) is measured by the angle formed between the centre of femoral head to the midpoint of the S1 endplate and a perpendicular vertical line from the horizontal. Pelvic tilt(PT) measured by the angle between a line connecting the center of the femoral heads with the center of the S1 endplate and the vertical. Sacral slope(SS) is measured by the angle of the S1 endplate with the horizontal. Sagittal vertical axis(SVA) is measured by the distance between a C7 vertical plumb line with the superior posterior corner of S1. Sacro-femoral angle(KFA) is measured by the middle of the S1 endplate and the bicoxofemoral axis and the line between the bicoxofemoral axis and the femoral axis. Knee angle(KA) is defined as the angle between the mechanical axis of the femur and the mechanical axis of the tibia. Ankle angle(AA) is defined as the angle between the mechanical axis of the tibia and the plumb line. Pelvic shift (P.shift) is measured by the sagittal offset between the posterosuperior corner of sacrum and the anterior cortex of distal tibia

Figure 3 A 46-year-old female, with lumbar spinal stenosis **a** Full-body sagittal splicing radiograph: TK 44.5°, LL 42.2°, PI 54.8°, PT 15.5°, SS 39.4°, SVA 3.5cm, KFA 198.1°, KA 14.1°, AA 21.4°, and P.shift 153.7mm **b** Whole-spine lateral radiograph: TK 39.3°, LL 39.1°, PI 57.9°, PT 17.7°, SS 40.2°, and SVA 4.4cm **c** Lateral scanogram: PI 57.6°, PT 15.4°, SS 42.1°, KFA 197.3°, KA 15.3°, AA 22.5°, and P.shift 147.9mm

其能够在较传统 X 线片和 CT 放射剂量明显降低的情况下获得高质量的图像, 尤其适合需要频繁摄片的患者和儿童(标准剂量 EOS 成像系统放射剂量比常规放射影像系统低 5~10 倍)^[26]。但目前 EOS 设备高昂的采购价格及运行成本, 严重限制了其推广应用, 全世界仅部分地区与单位投放使

用。费用预算分析结果提示, 该设备技术费用尚未进入医保, 且定价偏高, 需年均工作日 20 人次左右可达到收支平衡, 仅适合高端医疗路线及 3D 重建的手术临床研究, 且其所必须适应证少, 仅适合骨科专科医院使用, 这是造成我国无法普及该技术的主要原因。

表 1 人体矢状面全长 X 线片与全脊柱侧位 X 线片上矢状面参数测量结果对比

Table 1 Comparison of parameters between full-body sagittal splicing radiograph and whole-spine lateral radiograph

	矢状面全长 X 线片 Full body splicing radiograph	全脊柱侧位 X 线片 Whole spine lateral radiograph ^c	P 值 P value
胸椎后凸角 TK(°)	28.4±13.8	26.7±12.5	0.969
腰椎前凸角 LL(°)	40.5±8.3	37.3±6.9	0.956
骨盆入射角 PI(°)	51.7±10.1	52.4±9.7	0.929
骨盆倾斜角 PT(°)	17.2±6.8	18.5±5.1	0.959
骶骨倾斜角 SS(°)	34.5±12.5	33.9±11.5	0.929
矢状面平衡 SVA(cm)	6.4±2.5	7.2±2.8	0.948

表 2 人体矢状面全长 X 线片与下肢侧位 X 线片处矢状面参数测量结果对比

Table 2 Comparison of parameters between full-body sagittal splicing radiograph and lateral scanogram

	矢状面全长 X 线片 Full body splicing radiograph	下肢侧位 X 线片 Lateral scanogram	P 值 P value
骨盆入射角 PI(°)	51.7±10.1	52.5±10.1	0.905
骨盆倾斜角 PT(°)	17.2±6.8	17.3±6.1	0.952
骶骨倾斜角 SS(°)	34.5±12.5	35.2±12.2	0.924
骶股角 KFA(°)	198.5±11.3	205.4±11.2	0.955
膝关节角 KA(°)	28.6±7.9	26.3±6.6	0.782
踝关节角 AA(°)	23.2±4.1	21.9±3.5	0.869
骨盆位移 P.shift(mm)	224.5±33.6	216.2±29.3	0.938

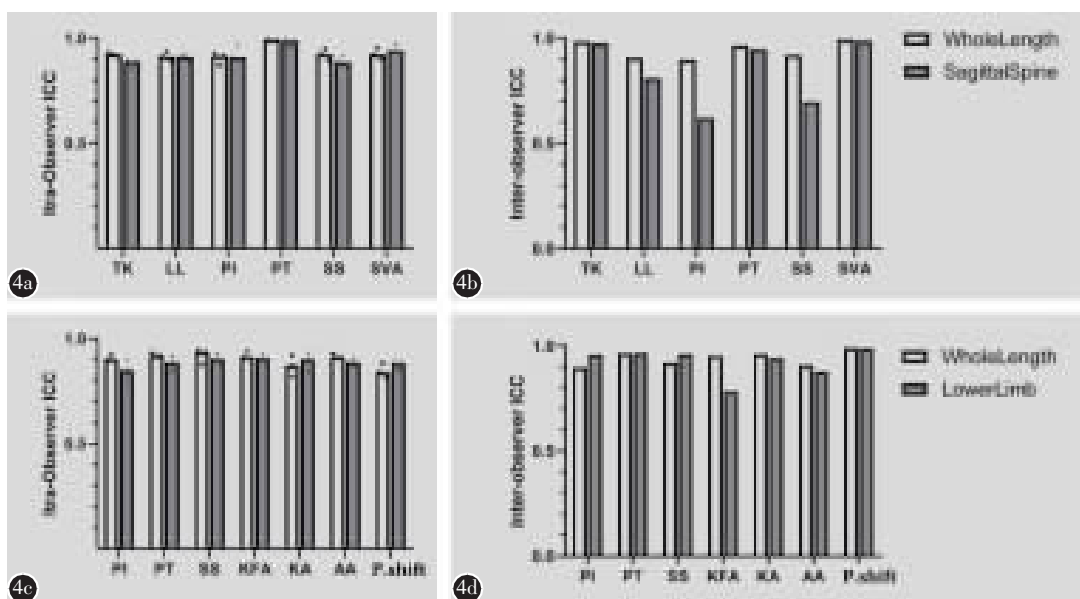


图 4 a 人体矢状面全长片与全脊柱侧位片上观察者内的可重复性 b 人体矢状面全长片与全脊柱侧位片上观察者间的可重复性 c 人体矢状面全长片与下肢侧位片上观察者内的可重复性 d 人体矢状面全长片与下肢侧位片上观察者间的可重复性

Figure 4 a Intraobserver reproducibility of the full-body sagittal splicing radiograph and the whole-spine lateral radiograph b Interobserver reproducibility of the full-body sagittal splicing radiograph and the whole-spine lateral radiograph c Intraobserver reproducibility of the full-body sagittal splicing radiograph and the lateral scanogram d Interobserver reproducibility of the full-body sagittal splicing radiograph and the lateral scanogram

本研究采用传统 DR 摄片技术系统对人体全长 X 线片进行拼接,构建人体全长 X 线片,其可实现多幅图像局部重叠区域的配准,通过特征匹配、特征检测、图像混合和空间坐标转换等步骤精确地拼接出人体全长图像。摄片时,在 X 线球管曝光时将束光器的宽度限定在 40~60mm 范围内以保证 X 线束接近平行,以接近垂直的方向均匀照射于人体,避免了以往扇形 X 线束对影像两端形成的放大效应,从而保证影像图片两端拼接的准确性。曝光时,X 线球管与 IP 板沿摄影架纵轴做同步、均匀移动。曝光过程中嘱患者深呼吸后屏气以减少胸腔气体量。在进入拼接模式后采用小视野、小焦点,并增加曝光次数的方法,最大程度减少了边缘的斜射失真度。应用自动曝光控制 AEC 曝光,在不影响影像质量的情况下,可根据临床要求拼接图像等来增减剂量。在图像拼接的精确度上,其可见短时间内自动连续曝光,探测器自动同步定位,比手动拼接更有效地降低了由于患者身体移动引起的拼接误差率。这样构建的人体矢状位全长片具有图像放大率低,拼接后影像清晰,密度均匀,无明显拼接缝伪影的特点。基本满足了临床医生在临床诊疗过程中对影像图片的质量要求。

本研究中 30 例志愿者均完成了人体全长片、全脊柱片、下肢片三项检查,采用 DR 摄片系统构建的人体全长 X 线片可以获得满意的人体矢状位图像,通过独立样本 t 检验验证了人体矢状位全长 X 线片分别与全脊柱侧位 X 线片、下肢侧位 X 线片的各参数测量值之间具有较好的一致性。应用组内相关系数对全脊柱侧位片和下肢侧位片观察者内和观察者间的可重复性进行评估,人体矢状面全长片较全脊柱侧位片及下肢侧位片观察者内和观察者间显示了良好的可重复性。验证了人体矢状面全长片作为 EOS 系统替代方法具有可行性、准确性,可获得临床医生在相关疾病评估过程中对影像学图像的要求。

与 EOS 系统相比,新型人体全长 X 线片所需设备在基层医疗机构广泛存有,检查费用低,适宜于各类脊柱疾患的平衡及稳定性评价及筛查,如匹配正在研发中的“同轴”投影技术并利用重建参数进行实时修正,亦可获得具有临床应用价值的三维成像^[27,28]。相对于传统 X 线影像,新型人体全长 X 线片具有一次性拼接成形能力,放射剂量较

低(比标准放射剂量低 1 倍)。这项技术的不足在于:(1)部分病例人体全长 X 线片的 C7 椎体及上胸段显示不清,主要原因是因为曝光强度不足,与肩部肌肉厚度和胸廓遮挡有关。(2)人体全长 X 线片相对于 EOS 系统放射剂量有着明显增加,尤其需要术后定期随访者和儿童,如何在降低放射剂量同时获得清晰影像图片是亟待解决的问题;(3)与 EOS 系统相比,由于需要多次成像,检查时间有所延长,对于部分严重矢状面失衡,以及伴有严重髋膝关节病变患者来说,站立困难,在两次拍摄过程中可能会导致测量结果出现误差,无法反映真正的矢状面平衡;(4)与分段的 DR 片相比,有部分拼接片对骨小梁的显示仍有待提高。

本研究的局限性在于:(1)本研究缺乏对人体冠状面可靠性评估及相关参数测量数据分析;(2)本研究纳入患者样本量较小,结果可能存在偏倚;(3)本研究缺乏男女性患者的对比分析,在后续研究中应纳入更多的研究对象。

综上所述,通过 DR 摄片系统构建人体全长 X 线片有效可行,在评价人体整体矢状面平衡时具有良好的准确性和可重复性,可以为脊柱外科医生评估人体矢状面整体力线提供可靠的影像学依据。随着人体全长 X 线片技术在各基层医疗机构中的推广应用,通过大量样本的反复验证及探讨、拼接软件及清晰成像技术的不断更新,越来越多的临床数据会证实其在诊断、术前手术方案的制定和术后评价中有重要作用,特别是对髋-腰综合征、重度腰椎滑脱、退变性脊柱侧后凸畸形等脊柱疾病,从而为实际临床工作方式带来革新,将在未来对整体稳定乃至相关手术中起到指导性作用。

4 参考文献

1. Schwab F, Patel A, Ungar B, et al. Adult spinal deformity—postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? an overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery[J]. Spine, 2010, 35(25): 2224–2231.
2. Lee CS, Park SJ, Chung SS, et al. The effect of simulated knee flexion on sagittal spinal alignment: novel interpretation of spinopelvic alignment[J]. Eur Spine J, 2013, 22(5): 1059–1065.
3. Lazennec JY, Brusson A, Folinais D, et al. Measuring extension of the lumbar–pelvic–femoral complex with the EOS (R) system[J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2015, 25(6): 1061–

- 1068.
4. Wybier M, Bossard P. Musculoskeletal imaging in progress: the EOS imaging system[J]. *Joint Bone Spine*, 2013, 80(3): 238–243.
5. Jeon CH, Kwack KS, Park S, et al. Combination of whole spine lateral radiograph and lateral scanogram in the assessment of global sagittal balance[J]. *Spine J*, 2018, 18(2): 255–260.
6. Legaye J, Duval-Beaupere G, Hecquet J, et al. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves[J]. *Eur Spine J*, 1998, 7(2): 99–103.
7. Barrey C, Jund J, Perrin G, et al. Spinopelvic alignment of patients with degenerative spondylolisthesis [J]. *Neurosurgery*, 2007, 61(5): 981–986.
8. Labelle H, Roussouly P, Chopin D, et al. Spino-pelvic alignment after surgical correction for developmental spondylolisthesis[J]. *Eur Spine J*, 2008, 17(9): 1170–1176.
9. Lafage V, Schwab F, Patel A, et al. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity[J]. *Spine*, 2009, 34(17): E599–606.
10. Le Huec JC, Aunoble S, Philippe L, et al. Pelvic parameters: origin and significance[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(5): 564–571.
11. Le Huec JC, Leijssen P, Duarte M, et al. Thoracolumbar imbalance analysis for osteotomy planification using a new method: FBI technique[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(5): 669–680.
12. Kim HJ, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Patients with proximal junctional kyphosis requiring revision surgery have higher postoperative lumbar lordosis and larger sagittal balance corrections[J]. *Spine*, 2014, 39(9): 576–580.
13. Rose PS, Bridwell KH, Lenke LG, et al. Role of pelvic incidence, thoracic kyphosis, and patient factors on sagittal plane correction following pedicle subtraction osteotomy [J]. *Spine*, 2009, 34(8): 785–791.
14. Barrey C, Roussouly P, Perrin G, et al. Sagittal balance disorders in severe degenerative spine: can we identify the compensatory mechanisms[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(5): 626–633.
15. Lafage V, Schwab FW, Hawkinson N, et al. Standing balance and sagittal plane spinal deformity: analysis of spinopelvic and gravity line parameters[J]. *Spine*, 2008, 33(14): 1572–1578.
16. Schwab F, Patel A, Ungar B, et al. Adult spinal deformity—postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? an overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery [J]. *Spine*, 2010, 35(25): 2224–2231.
17. Diebo BG, Oren JH, Challier V, et al. Global sagittal axis: a step toward full-body assessment of sagittal plane deformity in the human body[J]. *J Neurosurg Spine*, 2016, 25(4): 494–499.
18. Lee SM, Yoon MG, Moon MS, et al. Effect of correction of the contractured flexed osteoarthritic knee on the sagittal alignment by total replacement[J]. *Asian Spine J*, 2013, 7(3): 204–211.
19. Diebo BG, Ferrero E, Lafage R, et al. Recruitment of compensatory mechanisms in sagittal spinal malalignment is age and regional deformity dependent: a full-standing axis analysis of key radiographical parameters[J]. *Spine*, 2015, 40(9): 642–649.
20. Faro FD, Marks MC, Pawelek J, et al. Newton PO evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine*, 2004, 29(20): 2284–2289.
21. Lazenec JY, Folinais D, Bendaya S, et al. The global alignment in patients with lumbar spinal stenosis: our experience using the EOS full-body images[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2016, 26(7): 713–724.
22. Wybier M, Bossard P. Musculoskeletal imaging in progress: the EOS imaging system[J]. *Joint Bone Spine*, 2013, 80(3): 238–243.
23. Morvan G, Mathieu P, Vuillemin V, et al. Standardized way for imaging of the sagittal spinal balance [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(5): 602–608.
24. Deschenes S, Charron G, Beaudoin G, et al. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager[J]. *Spine*, 2010, 35(9): 989–994.
25. Somoskeoy S, Tunyogi-Csapo M, Bogyo C, et al. Accuracy and reliability of coronal and sagittal spinal curvature data based on patient-specific three-dimensional models created by the EOS 2D/3D imaging system[J]. *Spine J*, 2012, 12(11): 1052–1059.
26. Dubousset J, Charpak G, Dorion I, et al. A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: the EOS system[J]. *Bull Acad Natl Med*, 2005, 189(2): 287–300.
27. Zuo C, Feng SJ, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review [J]. *Opt Lasers Eng*, 2018, 109: 23–59.
28. Liu P, Shao PE, Ma JM, et al. A co-axial projection surgical navigation system for breast cancer sentinel lymph node mapping: system design and clinical trial[J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2019, 10868: 108680N.
- (收稿日期: 2020-06-03 末次修回日期: 2020-07-09)
- (英文编审 谭 啸)
- (本文编辑 卢庆霞)