

三维超声成像技术测量青少年特发性脊柱侧凸患者 顶椎旋转角度的信度与效度分析*

王谦^{1,2,3}, 李梦³, 柳学明⁴, 黄文生^{3△}, 何成奇^{1,2}

1. 四川大学华西医院 康复医学中心(成都 610041); 2. 康复医学四川省重点实验室(成都 610041);
3. 香港理工大学 生物医学部(香港 999077);
4. 加拿大阿尔伯塔大学 外科学部 格伦罗斯康复研究中心(埃德蒙顿 T6G2E8)

【摘要】 目的 评价三维超声成像技术测量青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)患者椎骨在水平面上旋转角度的信度与效度。方法 16例AIS女性患者纳入研究。由2位测评者进行三维超声扫描3次。所有三维超声图像随机分配,盲法测量3次,测量间隔1周。三维超声成像通过计算椎骨两侧的椎板中心连线与水平参考线之间的夹角,测量顶椎旋转角度;同时采用核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI) Aaro-Dahlborn方法测量AIS患者顶椎旋转角度作为对照。采用组内相关系数($ICC[2, k]$)、平均测量差值和标准误评价三维超声测量结果的信度;通过与MRI测量结果比较,采用配对 t 检验、Bland-Altman方法及Pearson相关系数进行其效度评价。结果 三维超声成像技术测量AIS顶椎旋转角度的测评者内与测评者间 $ICC[2, k] > 0.9$,平均测量差值小于 3.0° 。三维超声和MRI测量结果之间差异无统计学意义($P > 0.05$);且两种方法之间具有较高的一致性和相关性($r > 0.9$)。结论 三维超声成像技术作为一种无辐射的影像学方法,可用于AIS顶椎在水平面上旋转角度的评估。

【关键词】 特发性脊柱侧凸 三维超声 椎骨旋转 信度 效度

Three-dimensional Ultrasound Assessment on Apical Vertebral Rotation in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis: Reliability and Validity Analyses WANG Qian^{1,2,3}, LI Meng³, LOU H. M. Edmond⁴, WONG Man-sang^{3△}, HE Cheng-qi^{1,2}. 1. Center of Rehabilitation Medicine, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Rehabilitation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China; 3. Department of Biomedical Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 4. Department of Surgery, Glenrose Rehabilitation Research Centre, University of Alberta, Edmonton T6G2E8, Canada

△ Corresponding author, E-mail: m. s. wong@polyu. edu. hk

【Abstract】 Objective To assess reliability and validity of the three-dimensional (3-D) ultrasound measurement of apical vertebral rotation in patients with adolescent idiopathic scoliosis (AIS). **Methods** Sixteen female AIS patients were recruited. Ultrasound examinations were performed using a 3-D ultrasound unit with a SonixGPS system, which were compared with magnetic resonance imaging (MRI) examinations conducted on the same day. Two raters performed 3-D ultrasound scanning in supine position on angle measurements for vertebral rotation in the transverse plane three times, respectively. The center of laminae (COL) method was used to measure apical vertebral rotation in the 3-D ultrasound image, compared with the Aaro-Dahlborn results of MRI. Reliability of the 3-D ultrasound measurements was assessed using intra-class correlation coefficients (ICC), mean absolute deviation (MAD), standard deviation (SD) and standard error of measurement (SEM). Validity of the 3-D ultrasound measurements was assessed using paired Student t -tests, Bland-Altman statistics and Pearson correlation coefficients. The level of significance was set as 0.05. **Results** 3-D ultrasound had high intra- and inter-rater reliabilities ($ICC[2, k] > 0.9$, $P < 0.05$) for assessing vertebral rotation. There was no significant difference between the Aaro-Dahlborn results in MRI and the COL results in 3-D ultrasound ($P > 0.05$). High consistencies (Bland-Altman) and correlations (Pearson) were demonstrated between the two methods. **Conclusion** Radiation-free 3-D ultrasound is a reliable and valid method for measuring apical vertebral rotation in the transverse plane of patients with AIS.

【Key words】 Adolescent idiopathic scoliosis 3-D ultrasound Vertebral rotation Reliability Validity

* 香港特别行政区研究基金委员会面上项目(No. PolyU5634/13M)资助

△ 通信作者, E-mail: m. s. wong@polyu. edu. hk

青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是一种常见的脊柱三维畸形, 表现为冠状面和矢状面上椎体侧凸畸形, 以及水平面上椎骨旋转畸形^[1-2]。椎骨旋转角度是评估 AIS 的一项重要参数, 能够预测 AIS 侧凸进展的风险及评价其治疗效果^[3]。另外, 椎骨旋转角度的大小与椎体侧凸、胸廓畸形及肋骨隆起的程度相关^[4-6]。因此, AIS 筛查、监测和随访的临床实践中, 可靠的且有效的测量椎骨旋转角度具有重要意义。临床上常用 X 线检查作为 AIS 诊断与评估的标准^[2, 7]。然而, 多次 X 线检查会使患者暴露于 X 线辐射中, 增加肿瘤等疾病的发生率; 此外, X 线图像将三维的脊柱结构投射在二维的胶片上, 不能真正的反映出脊柱侧凸三维空间的病变特征^[8]。随着脊柱侧凸三维矫正技术的开展及减少 X 线辐射量的基本要求, 探索更加安全、可靠和准确的三维影像学评估方法成为 AIS 的研究热点。

超声成像技术是一种无辐射的影像学检查方法。在影像学三维重建技术的基础上, 三维超声 (three-dimension ultrasound, 3-D US) 成像能够从三维平面评估 AIS 的脊柱畸形特征^[9-10]。近年来, 三维超声成像技术实现了在水平面上显示椎骨后部棘突、椎板和横突等结构标志^[11-12]; 在上述结构标志基础上, 借助计算机软件程序测量 AIS 椎体在冠状面上的侧凸角度^[13-15]。然而, 有关三维超声成像技术测量椎骨旋转角度的研究较少。因此, 在前期研究^[15]的基础上, 本研究进一步探索三维超声成像技术评估 AIS 患者椎骨在水平面上的旋转角度, 并评价其测量结果的信度与效度。

1 对象与方法

1.1 临床伦理

临床试验获香港理工大学人体试验伦理委员会和香港中文大学-新界东医院联网临床研究伦理委员会批准。所有受试者于试验前被告知试验相关信息, 并签署知情同意书。由于受试者为青少年女性, 为保护受试者的隐私, 需要一名女性研究人员参与整个数据收集过程, 且受试者家属或监护人可以在场。

1.2 研究对象纳入标准

女性 AIS 患者; 年龄 10~18 岁; Cobb 角: 10° ~ 80° ; 无脊柱及心胸外科手术史。

1.3 临床试验设计

根据信度和一致性研究指南 (guidelines for reporting reliability and agreement studies, GRRAS)^[16], 本临床研究采用核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 结果作为对照, 评价三维超声成像测量椎骨旋转角度的信度和效度。为减少成像及测量误差, 三维超声和 MRI 检查在同一时间, 同一位位 (仰卧位) 下进行。扫描成像后, 两种方法的图像均进行随机分配, 2 位具有一定超声和 MRI 测量经验的测评者随机抽取进行测量; 所有图像均需进行 3 次测量, 每次测量间隔 1 周, 且测量过程中对 2 位测评者采取盲法。

1.4 三维超声成像

1.4.1 三维超声成像系统 三维超声成像系统^[15]由 SonixTABLET (Analogic, Massachusetts, USA)、凸式超声探头 (C5-2/60) 以及内置电磁跟踪感受器、SonixGPS 定位装置、driveBAY 三维空间导航装置 (Ascension Ltd., USA) 组成。三维超声成像参数: 频率 2.5 MHz, 透射深度 8 cm, 增益值 10% (图 1A)。

1.4.2 三维超声扫描方法 三维超声扫描过程参照三维超声成像评估 AIS 患者椎体侧凸角度的扫



图 1 三维超声成像系统及仰卧位扫描成像

Fig 1 3-D ultrasound system and 3-D ultrasound scan in the supine position

A: 3-D ultrasound system; B: A patient with AIS; C: Ultrasound scanning was undertaken in the supine position

描方法^[15],主要步骤如下:首先确定 AIS 患者脊柱侧凸轮廓曲线(1B);平躺使双侧髂前上棘 (anterior superior iliac spines, ASISs) 在同一水平面,从 C7 至 S1 椎体匀速缓慢完成超声扫描 (1C)。扫描完成后,在二维超声成像基础上,由自行研发软件进行三维超声图像重建及测量。

三维超声重建图像主要反映脊柱及椎骨后方的

结构标志:在冠状面上,显示 T1~S1 椎的椎板以及 12 对肋骨 (图 2 A),最后一对肋骨对应 T12 椎体,用于三维超声图像上脊柱节段的确定;在水平面上,显示出椎体的棘突、椎板、横突和肋骨 (图 2 C);在矢状面上,显示出 T1~S1 椎体的棘突点 (图 2 B)。上述椎体的结构标志是应用三维超声评估和测量 AIS 的关键点。

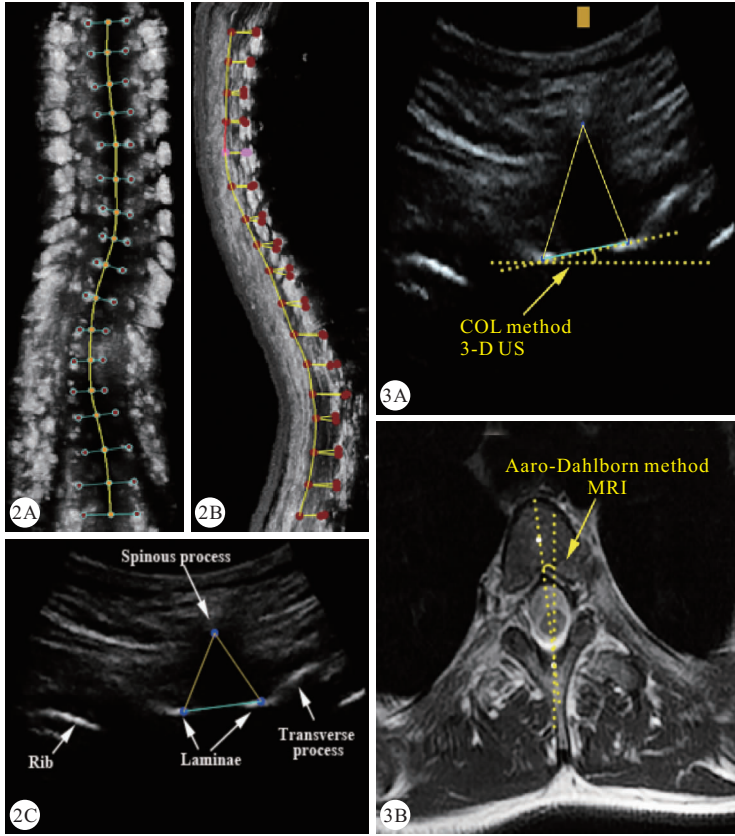


图 2 AIS 三维超声重建图像 图 3 三维超声和 MRI 成像测量椎骨旋转角度的比较

Fig 2 Reconstructed 3-D ultrasound (US) images of a scoliotic spine in the 3 orthogonal planes Fig 3 Comparison of apical vertebral rotation (AVR) measurements revealed by 3-D ultrasound and MRI (30 curves from 16 cases)

2A: Coronal plane; 2B: Sagittal plane; 2C: Transverse plane; 3A: Centers of laminae (COL) method in 3-D ultrasound; 3B: Aaro-Dahlborn method in MRI; 3C: Comparison of AVR measurements by Rater 1; 3D: Comparison of AVR measurements by Rater 2

1.4.3 三维超声测量方法 三维超声采用椎板中心法 (center of laminae, COL) 测量 AIS 顶椎在水平面上的旋转角度,即在超声图像水平面上,两侧椎板中心连线与水平参考线之间的夹角,被认为是椎骨的旋转角度 (图 3A)^[17-18]。一般情况下,顶椎旋转角度 (apical vertebral rotation, AVR) 最大,具有临床诊断意义^[8, 19]。因此,我们选取 AIS 患者顶椎旋转角度作为本研究的关注点。三维超声图像上顶椎的确定方法:在冠状面上顶椎倾斜角度最小,并与骶骨正中中线 (central vertical sacral line, CVSL) 距

离最远;在水平面上顶椎旋转角度最大。
1.5 MRI 成像技术
1.5.1 MRI 成像系统 3.0T 飞利浦 MRI 成像系统 (Achieva, Philips Medical Systems, Netherlands)^[15],配有 Achieva 脊柱阵列线圈。扫描范围:矢状位从枕骨大孔至骶骨;水平位选取顶椎上、下各 2 个椎体。测量软件: DICOM Viewer Version R3.0 SP3 (Philips, Netherland),在冠状位、矢状位和水平位上同步预览和测量,导出原始数据。

1.5.2 MRI 测量方法 参照 Aaro-Dahlborn 方法 (图 3B) 定义: 椎体中点与两侧椎板在后部的结合点之间的连线, 相比垂直参考线, 构成的夹角被认为是椎骨旋转角度^[19]。

1.6 统计学方法

计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 采用配对 *t* 检验 (两种测量方法之间差异性检验)、Bland-Altman 方法 (两种测量方法之间一致性检验^[21-22]) 及 Pearson 相关 (两种方法之间相关性检验) 评价三维超声测量方法的效度。通过计算组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC [2, *k*]) 评价三维超声测量结果的信度: ICC 值 > 0.80 表示信度较高^[20]。其次, 通过平均绝对差值 (MAD)、标准差 (*s*) 以及标准误 (SE) 评价三维超声测量结果的测量误差。P < 0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 纳入 AIS 病例特征

2014 年 1 月至 2015 年 11 月在香港中文大学-威尔士亲王医院对 40 例可疑的 AIS 女性受试者进行三维超声和 MRI 检查。其中, 16 例 AIS 女性患者符合纳入标准进入研究。

AIS 患者平均年龄为 (14.8 ± 1.7) 岁, 椎体侧凸角度为 10.2° ~ 68.2° (21.7° ± 15.9°)。本研究

中 AIS 弯和代偿性弯共计 30 个, 其中主胸弯 3 例, 主腰弯 1 例, 胸腰双主弯 10 例, 代偿性三弯 2 例。三维超声成像技术对上述 30 个侧弯进行顶椎旋转角度测量。

2.2 三维超声测量信度检验

2.2.1 组内相关系数 由表 1 可见, 三维超声测量 AIS 椎骨旋转角度的测评者组内 ICC [2, *k*] 值为 0.989 (0.979 ~ 0.994) 和 0.981 (0.966 ~ 0.990); 测评者间 ICC [2, *k*] 值为 0.978 (0.954 ~ 0.989)。结果提示三维超声 COL 测量方法评估 AIS 椎骨旋转角度具有较高的信度。

表 1 三维超声 COL 测量 AIS 椎骨旋转角度的测评者内/间信度
Table 1 Intra- and inter-rater reliability of apical vertebral rotation assessments using 3-D ultrasound (COL method)

Observer	Curve/ <i>n</i>	ICC [2, <i>k</i>] (95% CI)
R1	30	0.989 (0.979-0.994)
R2	30	0.981 (0.966-0.990)
R1/R2	30	0.978 (0.954-0.989)

COL: Center of laminae; ICC: Intra-class correlation; CI: Confidential interval

2.2.2 测评者测量误差 表 2 显示了三维超声测量椎骨旋转角度的测评者内/测评者间测量误差值。结果表明, 同一位测评者或不同测评者应用三维超声成像 COL 测量方法评估 AIS 椎骨旋转角度的测量误差较小。

表 2 三维超声 COL 评估 AIS 椎骨旋转角度的测评者内/测评者间测量误差

Table 2 Intra- and inter-rater differences in apical vertebral rotation assessments using 3-D ultrasound (COL method)

Observer	Curve/ <i>n</i>	MAD (95% CI) / °	<i>s</i> (95% CI) / °	SE (95% CI) / °
R1	30	0.4 (0.1-0.7)	0.2 (0.1-0.5)	0.2 (0.1-0.4)
R2	30	0.5 (0.1-1.1)	0.3 (0.1-0.7)	0.2 (0.1-0.5)
R1/R2	30	0.8 (0.0-3.0)	0.6 (0.0-2.1)	0.4 (0.0-1.5)

COL: Center of laminae; MAD: Mean absolute difference; *s*: Standard deviation; SE: Standard error of measurement

2.3 三维超声测量效度检验

2.3.1 平均值比较 三维超声采用 COL 方法测量 AIS 侧凸弧度的顶椎旋转角度, 其测量平均值为 7.5° ± 5.2°; MRI 采用 Aaro-Dahlborn 方法测量, 其测量平均值为 7.7° ± 5.7°; 两种方法测量结果之间差异无统计学意义 (P > 0.05), 测量结果对比见图 3 C、3D。

2.3.2 Bland-Altman 一致性研究 如图 4 所示, 三维超声和 MRI 测量结果之间的一致性较高 (图 4)。对于全部侧弯弧度 (*n* = 30), 两种方法测量差值的均数为 0.2°, 95% 一致性界限的上下限值为 -1.4° ~ 1.8°。

2.3.3 Pearson 相关性研究 采用 Pearson 相关系

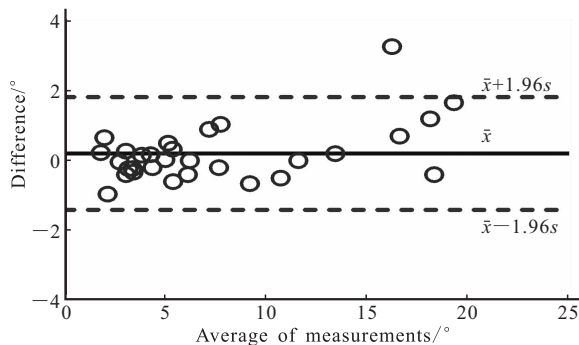


图 4 Bland-Altman 方法评价三维超声与 MRI 测量结果的一致性
Fig 4 Agreement of results between 3-D ultrasound and MRI for assessing apical vertebral rotation as indicated in Bland-Altman plot

数评价三维超声成像 COL 测量方法和 MRI 成像 Aaro-Dahlborn 测量方法评估 AIS 椎骨旋转角度之间的相关性(图 5)。结果显示两种方法测量结果之间的相关性较高(相关系数 $r > 0.9$, $P < 0.05$)。

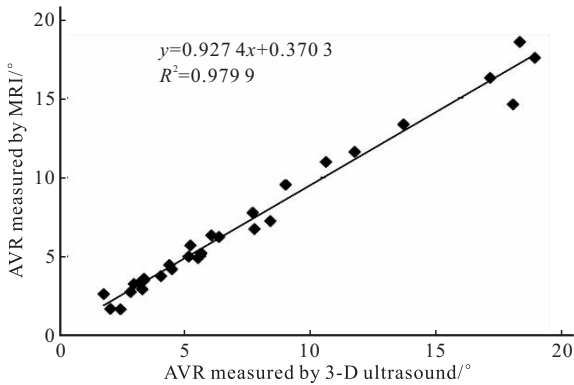


图 5 Pearson 方法评价三维超声与 MRI 测量结果的相关性

Fig 5 Pearson correlations of results measured by 3-D ultrasound and by MRI for assessing apical vertebral rotation (AVR)

3 讨论

目前,评估 AIS 椎骨旋转角度的影像学方法有:X 线、CT 和 MRI^[8, 19]。X 线方法不能反映出椎骨在水平面上的变化,其测量结果只能间接估测 AIS 椎骨旋转角度。CT 和 MRI 成像技术均可直接显示椎骨在水平面上的变化。然而,全脊柱 CT 扫描产生大量的电离辐射,有害青少年的身体健康;MRI 检查费用较为昂贵,普及性低。

近年来,三维超声技术评估和测量 AIS 的研究成为该领域的创新点。三维超声成像是一种无辐射、三维平面的检查方法。研究发现,三维超声测量方法能够有效、准确的评估 AIS 椎体在冠状面上的侧凸角度^[13, 23-24]。体外实验^[17-18]中,研究者们探讨了如何应用三维超声成像技术测量 AIS 模型的椎骨旋转角度,提出应用 COL 法在水平面上测量椎骨旋转角度,且测量方法的信度和效度良好。在此基础上,本研究探讨三维超声成像 COL 测量方法能否在临床实践中应用于 AIS 患者的椎骨旋转角度的评估,以及其评估信度与效度。结果显示,应用三维超声成像 COL 测量方法评估 AIS 患者椎骨旋转角度的测评者内/间组内相关系数 ICC 值均大于 0.9, MAD、s 和 SEM 值分别小于 3.0°、2.1° 和 1.5°。上述结果表明,三维超声可用于测量 AIS 患者椎骨在水平面上的旋转角度,且具有较高的测评者内/间信度。

相比于 CT 成像方法,MRI 成像是一种无辐射的检查方法,符合临床试验的伦理要求。在本研究中,三维超声成像 COL 测量方法采用与 MRI 成像 Aaro-Dahlborn 测量方法进行比较评价其效度,结果显示,三维超声和 MRI 侧量 AIS 椎骨旋转角度的数据之间差异无统计学意义,且 Pearson 检验相关性高。同时,本研究采用 Bland-Altman 方法评价三维超声与 MRI 测量结果之间的一致性。95% 一致性界限内的最大差值越大,说明两种测量方法的一致性低^[21-22]。本研究中对于全部侧弯弧度 ($n = 30$),三维超声与 MRI 测量结果之间 95% 一致性界限的上下限值为 $-1.4^\circ \sim 1.8^\circ$,平均差值为 0.2° ,最大差值为 3.2° ,两种方法之间一致性较高。上述研究结果表明,三维超声成像 COL 方法测量 AIS 患者的椎骨旋转角度具有较高的效度。

在实际临床操作中,对比放射性 X 线及 MRI 影像学,超声测量的准确性更依赖于操作者的扫描技术,超声图像的清晰度是确定脊柱节段准确性的重要前提。其中,第一、二胸椎,第二、三腰椎的成像较为困难,胸腰椎节段的确定以第十二肋骨为关键点。当椎骨旋转角度过大,部分椎骨结构偏离正常位置,造成超声成像后相应棘突、椎板等结构缺失,影响椎骨旋转角度的测量。因此,为避免超声扫描过程对本研究结果的影响,2 位测评者都经过系统培训,在 10 位志愿者配合下,练习三维超声的全脊柱扫描及三维超声图像重建与测量。同时,在扫描过程中,超声探头需涂抹适量的耦合剂,以隔绝探头与体表的空气,保证探头与体表皮肤的良好接触。

根据超声成像特点,COL 法从水平面上评估与测量椎骨后部椎板的旋转程度。因此,胸椎和腰椎的椎板在矢状面上的形态差异,对于三维超声 COL 测量方法影响较小。此外,三维超声 COL 侧量方法的一致性取决于超声图像上椎板中心位置的一致性,而超声扫描过程中探头位置的改变会导致椎板中心位置的改变。因此,超声扫描要求探头垂直并紧贴受试者背部皮肤,从 C7 椎体开始,沿脊柱侧凸曲线匀速缓慢的移动至 S1 椎体结束。

研究报道,AIS 患者椎体侧凸角度与旋转角度之间具有相关性^[3]。在本研究中,椎体侧凸角度 (Cobb 角) 较大的 AIS 患者例数较少。因此,本研究结果适用于 AIS 轻中度侧凸患者 ($10^\circ \sim 45^\circ$),三维超声测量 AIS 重度侧凸患者 ($>45^\circ$) 的椎骨旋转角度的信度与效度有待进一步研究。

综上所述,三维超声成像技术作为一种无辐射

的影像学评估方法,可用于评估 AIS 患者顶椎在水平面上的旋转角度, COL 法测量具有较高的信度与效度。本研究结果为三维超声成像技术在 AIS 临床诊断和评估中的应用提供理论依据;有助于探寻 AIS 无辐射、三维的影像学检查技术。

参 考 文 献

- [1] WEINSTEIN SL, DOLAN LA, CHENG JC, *et al.* Danielsson and J. A. Morcuende adolescent idiopathic scoliosis. *Lancet*, 2008, 371(9623): 1527-1537.
- [2] HRESKO MT. Clinical practice. Idiopathic scoliosis in adolescents. *N Engl J Med*, 2013, 368(9): 834-841.
- [3] LAM GC, HILL DL, LE LH, *et al.* Vertebral rotation measurement: a summary and comparison of common radiographic and CT methods. *Scoliosis*, 2008, 3; 16 [2017-10-20]. <https://doi.org/10.1186/1748-7161-3-16>.
- [4] CUI GY, WATANABE K, NISHIWAKI YJ, *et al.* Loss of apical vertebral derotation in adolescent idiopathic scoliosis: 2-year follow-up using multi-planar reconstruction computed tomography. *Eur Spine J*, 2012, 21(6): 1111-1120.
- [5] DI SILVESTRE M, LOLLI F, BAKALOU DIS G, *et al.* Apical vertebral derotation in the posterior treatment of adolescent idiopathic scoliosis: myth or reality? *Eur Spine J*, 2013, 22(2): 313-323.
- [6] CHAN AC, MORRISON DG, NGUYEN DV, *et al.* Intra- and interobserver reliability of the cobb angle-vertebral rotation angle-spinous process angle for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform*, 2014, 2(3): 168-175.
- [7] NEGRINI S, AULISA AG, AULISA L, *et al.* 2011 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis*, 2012, 7(1): 3 [2017-10-20]. <https://doi.org/10.1186/1748-7161-7-3>.
- [8] KOTWICKI T. Evaluation of scoliosis today: examination, X-rays and beyond. *Disabil Rehabil*, 2008, 30(10): 742-751.
- [9] CHEUNG CW, LAW SY, ZHENG YP. Development of 3-D ultrasound system for assessment of adolescent idiopathic scoliosis: And system validation. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2013, 2013: 6474-6477 [2017-10-20]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6611037/>.
- [10] VO QN, LOU EH, LE LH. Reconstruction of a scoliotic spine using a three-dimensional medical ultrasound system. *Scoliosis*, 2015, 10 (Suppl 1): P17 [2017-10-20]. <http://www.Scoliosisjournal.com/content/10/S1/17>.
- [11] CHEN W, LOU EH, LE LH. Using ultrasound imaging to identify landmarks in vertebra models to assess spinal deformity. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2011: 8495-8498 [2017-10-20]. https://www.researchgate.net/publication/221758191_Using_ultrasound_imaging_to_identify_landmarks_in_vertebra_models_to_assess_spinal_deformity.
- [12] CHEN W, LE LH, LOU EH. Ultrasound imaging of spinal vertebrae to study scoliosis. *Open J Acoust*, 2012, 2(3): 95-103 [2017-10-20]. http://file.scirp.org/Html/1-1610035_22602.htm.
- [13] ZHENG R, CHAN AC, CHEN W, *et al.* Intra- and inter-rater reliability of coronal curvature measurement for adolescent idiopathic scoliosis using ultrasonic imaging method—a pilot study. *Spine Deform*, 2015, 3(2): 151-158.
- [14] ZHENG R, YOUNG M, HILL D, *et al.* Improvement on the accuracy and reliability of ultrasound coronal curvature measurement on ais with the aid of previous radiographs. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2016, 41(5): 404-411.
- [15] 何红晨, 王 谦, 柳学明, 等. 三维超声用于青少年特发性脊柱侧凸评估的信度与效度研究. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(2): 146-150.
- [16] KOTTNER J, AUDIGE L, BRORSON S, *et al.* Streiner guidelines for reporting reliability and agreement studies (GRRAS) were proposed. *Int J Nurs Stud*, 2011, 48(6): 661-671.
- [17] CHEN W, LOU E, LE LH. A Reliable semi-automatic program to measure the vertebral rotation using the center of lamina for adolescent idiopathic scoliosis. 5th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam, 2015: 159-162 [2017-10-20]. <http://www.docin.com/p-1461223846.html>. doi: 10.1007/978-3-319-11776-8_39
- [18] VO QN, LOU EH, LE LH. Measurement of axial vertebral rotation using three-dimensional ultrasound images. *Scoliosis*, 2015, 10(Suppl 2): S7 [2017-10-20]. <https://doi.org/10.1186/1748-7161-10-S2-S7>.
- [19] VRTOVEC T, PERNUŠ F, LIKAR B. A review of methods for quantitative evaluation of axial vertebral rotation. *Eur Spine J*, 2009, 18(8): 1079-1090.
- [20] CURRIER DP. In: Elements of research in physical therapy. Third Edition. Baltimore: Williams and Wilkins, 1990: 160-171.
- [21] BLAND JM, ALTMAN DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*, 1986, 327(8476): 307-310.
- [22] BLAND JM, ALTMAN DG. Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading. *Lancet*, 1995, 346(8982): 1085-1087.
- [23] WANG Q, LI M, LOU EH, *et al.* Reliability and validity study of clinical ultrasound imaging on lateral curvature of adolescent idiopathic scoliosis. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0135264 [2017-10-20]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135264>.
- [24] YOUNG M, HILL DL, ZHENG R, *et al.* Reliability and accuracy of ultrasound measurements with and without the aid of previous radiographs in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J*, 2015, 24(7): 1427-1433.

(2017-09-25 收稿, 2017-11-27 修回)

编辑 沈 进