

DOI:10.16781/j.0258-879x.2020.11.1177

• 专题报道 •

脊柱畸形的影像学参数测量及其研究进展

牛升波[△], 杨 桓[△], 杨明园, 陈 锴, 李 明*

海军军医大学(第二军医大学)长海医院骨科, 上海 200433

[摘要] 脊柱畸形是一种复杂的三维畸形, 其相关影像学测量对疾病的诊断分型、治疗选择、疗效评估和进展监测有重要意义。随着科学技术的发展与脊柱畸形研究的不断深入, 传统脊柱畸形测量方法与放射成像技术不断改进, EOS 影像系统和三维超声成像技术应用于脊柱畸形测量的可行性与有效性已被诸多研究证实, 新的测量工具、测量技术及人工智能的应用初见端倪。这些技术共同推动脊柱畸形测量朝着简单安全、高效精准、便于临床推广应用的方向发展。本文在回顾当前脊柱畸形影像学参数测量研究进展的基础上, 分析各种测量手段的优势与局限, 以期为临床应用与研究选择合适的测量方法提供借鉴。

[关键词] 脊柱侧凸; Cobb角; X线放射摄影术; EOS影像系统; 三维超声成像; 体表形态; 人工智能

[中图分类号] R 682.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2020)11-1177-06

Imaging parameter measurement of spinal deformity: research progress

NIU Sheng-bo[△], YANG Huan[△], YANG Ming-yuan, CHEN Kai, LI Ming*

Department of Orthopaedics, Changhai Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] Spinal deformity is a complex three-dimensional malformation. The related imaging measurements are vital to its diagnosis and classification, treatment selection, efficacy evaluation and progress monitoring. With the development of science and technology and the deepening of research on spinal deformity, conventional deformity measurement methods and radiographic imaging techniques have been continually improved. The feasibility and effectiveness of the application of EOS imaging system and three-dimensional ultrasound imaging technology in spinal deformity have been confirmed by many studies, and the application of new measurement tools, techniques and artificial intelligence is also emerging. These technologies jointly promote the development of the spinal deformity measurement, making it more simple, safe, efficient and accurate, and convenient for clinical application. In this paper, based on the review of the current research progress in the imaging parameter measurement of spinal deformity, the advantages and limitations are analyzed in order to provide references for clinical application and research.

[Key words] scoliosis; Cobb angle; X-ray radiography; EOS imaging system; three-dimensional ultrasound imaging; surface topography; artificial intelligence

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2020, 41(11): 1177-1182]

脊柱畸形是以冠状面偏离、矢状面失衡、水平面旋转为特征的三维畸形^[1], 若考虑其随着时间推移进展也可认为是一种四维畸形。其中青少年特发性脊柱侧凸(adolescent idiopathic scoliosis, AIS)最常见, 患病率为0.47%~5.20%, 女性患者多见, 且90%的患者发病年龄为11~18岁^[2-3]。根据不同平面的畸形特征, 脊柱畸形的测量包括冠

状面、矢状面和水平面参数, 广义的测量还包括脊柱骨盆参数、椎体与椎间盘高度、椎管与椎间孔大小、Risser征^[4]等。对脊柱畸形精准的测量和定量有利于进行正确的分型诊断和有效的畸形进展监测, 从而选择合适的治疗评估方法。然而, AIS在青春期进展快速, 文献报道Cobb角差值为5°时, 其真正存在差异的可能性为95%^[5], 提示畸形发

[收稿日期] 2020-01-17 [接受日期] 2020-02-13

[基金项目] 国家自然科学基金(31870985)。Supported by National Natural Science Foundation of China (31870985).

[作者简介] 牛升波, 博士生. E-mail: niushengbo@163.com; 杨 桓, 硕士生. E-mail: alexyang_chyy@126.com

[△]共同第一作者(Co-first authors).

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-31161700, E-mail: limingch@21cn.com

生进展^[6],因而精确的测量尤为重要。本文就脊柱畸形影像学参数测量的应用现状及研究进展进行综述。

1 基于传统影像学的脊柱畸形参数测量与应用

基于传统影像学的脊柱畸形测量是目前应用最广泛、认可度最高的方法。Cobb角自1948年被用于评估脊柱畸形,之后一直被作为脊柱畸形参数测量的金标准。随后椎弓根法、椎体重心法、侧切法等^[7]改良方法也逐步兴起,但均不及Cobb角应用广泛。传统标准的Cobb角测量法是参照X线片用椎体终板法测得,依靠人工测量。脊柱旋转畸形的经典测量法Nash-Moe法^[8],也是参照X线片粗略地评估椎体的旋转程度。这些方法受体位、成像技术、测量工具、测量者、端椎选择等诸多因素影响,均存在测量误差。例如Ho等^[9]选择了17例女性AIS患者的173个椎体进行测量,其中Nash-Moe法测量无旋转的椎体采用CT测量时均显示存在旋转,最高可达11°。之后相继提出的Perdriolle法和Raimondi法则是利用旋转测量仪测量椎体旋转^[10]。其他研究表明脊柱侧凸的3个平面相互影响,如矢状面的畸形很大程度上受到冠状面与水平面变化的影响^[11],脊柱冠状面不同弯曲的部位及程度对应矢状面不同形态的特征^[12]。因此,单一平面的参数测量对于评估畸形程度仍有不足,基于二维影像的测量和分型不能充分地反映脊柱畸形的三维特征,尤其是水平面的旋转畸形。

有学者回顾分析了48例AIS患者后路融合内固定术后疗效,结果显示Cobb角的进展并不能预测会发生“曲轴”现象^[13]。因此,为指导矫形治疗与疗效评估,还需要借助CT、MRI以了解脊柱畸形的三维特征。CT、MRI既可以从水平面对椎体旋转、椎管径线等进行精确测量,又可通过重建显示脊柱三维结构,还能提供脊髓、神经根、椎间盘等软组织信息。然而,CT与X线片都存在电离辐射,反复接触会使患者增加罹患乳腺癌、子宫内膜癌与甲状腺癌等风险^[14]。MRI无电离辐射,能清晰显示三维结构,虽操作费时、价格较贵,但目前被临床广泛接受。由于MRI与CT都需在仰卧位成像,非负重状态下成像测量会增加误差,虽然有学者提出站立位MRI,但尚需临床验证^[15]。

2 基于新引入成像技术的脊柱畸形参数测量与应用

2.1 EOS影像系统 EOS影像系统源于1992年诺贝尔物理学奖授予的超敏X射线探测技术,是一种低辐射剂量的X线装置^[16]。EOS影像系统平均放射剂量为0.11~0.30 mGy,使患者受到的辐射剂量较传统X线片减少80%~90%^[17]。2012年Somoskeöy等^[18]利用三维EOS影像系统测量侧凸脊柱冠状面与矢状面三维椎体矢量参数,通过与二维EOS影像测量的Cobb角相比,认为EOS影像系统三维椎体矢量参数能更有效地反映脊柱畸形的三维特征,可以指导脊柱畸形的三维分型。目前,已有学者尝试利用EOS影像系统对脊柱畸形进行三维分型,与传统二维分型比较,认为在Cobb角超过55°时,三维分型更能准确地指导治疗^[19]。Chung等^[20]利用脊柱模型模拟32种不同度数的弯曲,分别用计算机X线摄影术、数字X线摄影术与EOS影像技术测量Cobb角,统计分析发现3种方法的可靠性、一致性、兼容性令人满意,其中EOS影像技术的测量结果具有很好的预测性,认为EOS影像测量参数对脊柱畸形的治疗评估与进展监测有重要作用。EOS影像系统不仅放射剂量低,而且能获取脊柱全长站立位影像显示每个椎体的形态变化情况,避免仰卧位时非负重状态下可能发生的多平面畸形改变,减少仰卧位所致的测量误差,并能进行包括骨盆等在内的骨骼系统三维重建。有学者在站立位用EOS影像系统对全脊柱进行三维重建,通过比较不同阅片者之间测量胸腰椎旋转度数与骨盆参数,认为利用EOS影像系统具有很好的再现性与可靠性^[21]。然而,该作者指出研究中纳入的脊柱侧凸患者均为轻、中度,平均Cobb角为18.2°,重度侧凸患者因为解剖标志难以辨别可能不适用于EOS影像系统重建脊柱三维模型。Somoskeöy等^[22]发现在应用EOS影像系统重建脊柱全长站立位影像时,即使是经验丰富的专业操作人员,也需平均20~30 min才能完成,对于重度脊柱侧凸患者花费时间更长,并认为其可能是EOS影像系统的唯一缺陷。此外,与CT、MRI相比,EOS影像系统不能提供软组织信息,且相关设备价格昂贵,不易获取,不便应用于群体筛查与随访监测,目前尚处于研究阶段。

2.2 三维超声成像 超声因无辐射、低成本、便携和可实时成像等特点而受到广泛关注, 1989 年三维超声首次用于测量脊柱冠状面 Cobb 角与椎体旋转^[23]。而后, 诸多研究证明三维超声可通过检查椎体后方结构形态测量棘突角指导 AIS 的矫形治疗^[24-25], 追踪超声也逐渐应用于脊柱弯曲角度测量^[26]。2016 年 Wang 等^[27]报道了 16 例患者分别用仰卧位三维超声影像椎板中心法和 MRI Aaro-Dahlborn 法测量侧凸顶椎旋转度数, 统计分析结果显示前者具有很高的组内、组间信度, 与后者相比没有显著差异且具有高度一致性, 说明在 AIS 患者中应用三维超声测量椎体旋转是有效的, 同时指出 Cobb 角大小可能会影响三维超声测量椎体旋转的准确性。多项研究也证实了利用三维超声测量棘突角、横突角或椎板角评估脊柱畸形的可靠性与有效性^[28-29]。三维超声还可通过评估 AIS 患者俯卧位脊柱弯曲弹性指导矫形治疗^[30], 也可用于显示脊柱前屈时冠状面弯曲变化模式^[31]。然而, 以上超声测量方法都需使用复杂的成像设备与软件, 一定程度上限制了其临床应用。超声测量技术本身也存在不足之处, 一方面超声成像容易受到体内金属内置物、体型、脊柱畸形程度等影响; 另一方面超声只能从人体后背按照从 C₇ 到 S₁ 或从 L₅ 到 C₇ 的顺序进行扫描, 严重依赖于椎体后方结构, 从而忽略了椎体的畸形特征。此外, 超声测量的体位涵盖仰卧位和站立位, 站立位能够减少测量误差, 却不易维持相同姿势, 不如仰卧位稳定, 选择应用时需权衡利弊。

2.3 体表形态成像 为了避免辐射暴露, 依据体表形态的成像技术如四维立体光栅成像、三维扫描成像、云纹摄影技术等应用于脊柱畸形参数的测量。在矢状面参数测量方面, Tabard-Fougère 等^[32]分别用测斜仪与四维立体光栅成像测量 AIS 患者的胸椎后凸角 (thoracic kyphosis, TK) 与腰椎前凸角 (lumbar lordosis, LL), 并将结果与参照 X 线片用椎体终板法测得的 Cobb 角比较, 结果显示 2 种无辐射测量方法具有很高的可信度, 在有效性方面, 对 TK 高度有效, 对 LL 有效性一般, 因此认为 2 种方法可用于 AIS 患者 TK 进展情况的临床随访与评估。非接触三维扫描技术也用于脊柱畸形测量, 主要通过扫描物体表面, 收集形状、面积、颜色等数据对物体进行三维校准重建, 最初主要用于

逆向工程、机器零部件设计与空间重建等领域^[33]。近年来, 三维扫描被用于测量脊柱形状, 评估脊柱在不同姿势的生物力学或人体工程学情况, 在临床上通过对躯干几何形状进行逆向工程制作脊柱支具^[34]。Little 等^[35]对比了三维扫描与 MRI 观察到的椎体变化趋势, 认为在表面标志物辅助下的三维扫描可能为测量脊柱畸形矢状面曲率或骨骼变化内在改变提供了一种有用的方法。除了无辐射, 三维扫描还具有成本低、维度准确、性价比高等优点^[36]。然而, Goldberg 等^[37]指出体表表面形态与临床脊柱畸形参数之间的不一致一定程度上阻碍了三维扫描的临床应用。也有学者认为基于体表形态的畸形测量法大部分都是利用人体后背体表形态进行测量, 不能反映脊柱的真实畸形情况, 存在很大的局限性^[27]。

3 基于现代智能的脊柱畸形参数测量与应用

传统 Cobb 角及椎体旋转等参数需人工选择椎体利用量角器或专业测量仪进行手动测量, 专业性较强且耗费时间。此外, 测量所需关键椎体及解剖标志的选择会受到测量者的影响, 因而效率与准确性都不高。数字化技术与计算机软件设计的发展使计算机辅助自动测量在临床上得到广泛应用, 从半自动到全自动, 在极大提高效率的同时减少了部分由测量者导致的影响因素, 提高了测量精度。Papaliadis 等^[38]使用一种计算机辅助算法测量 Cobb 角, 发现该计算机算法测量结果可靠、效率高, 也减少了传统测量为获取高质量影像多次进行放射检查所造成的辐射暴露。Pan 等^[39]在计算机辅助下通过肺癌患者胸部 X 线片自动测量 Cobb 角, 通过与人工测量结果比较, 认为计算机辅助方法自动测量 Cobb 角具有很高的可靠性与精确性, 在诊断脊柱侧凸方面具有潜在的应用价值。

为进一步提高测量效率与精确度, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 领域的高精度算法与神经网络被引入临床应用。外推法是最常用的一种高精度算法。Wang 等^[40]提出了一项多视角外推网络结构, 该结构基于联合视觉网络、独立视觉网络和内部错误纠正系统, 通过独立学习 526 张 X 线片, 利用多角度 X 线片图像自动估算 Cobb 角。实验结果表明与其他自动化方法相比, 该算法对冠状面及矢状面 Cobb 角的自动测量具有较高的精度。

然而,目前无论是计算机辅助还是AI测量,仍需依靠放射影像,所以辐射暴露无法避免。

人体测量学工具因便于携带、操作简单、易于获取、测量快速等优点而被应用于脊柱畸形的测量,如牛津Cobb角测量仪(Oxford Cobbmeter)、脊柱侧凸测量仪(scoliometer)、脊柱侧凸测量鼠(spinal mouse)等。同样,随着智能手机的普及与应用软件(application, App)的开发,Tiltmeter、CobbMeter、Scoliogauge等手机测量App也被用于脊柱畸形参数的测量。其中Scoliogauge依据体表形态测量轴向躯干旋转,而Tiltmeter、CobbMeter则需要在X线片上测量Cobb角。这些方法可以与其他测量方法结合应用,便于随访评估与群体筛查。Ferràs-Tarragó等^[41]将智能手机与超声成像结合,依据横突位置测量脊柱Cobb角,与传统X线测量结果相比有很高的再现性与可靠性,由于设备容易获得,易于在临床应用,认为此法是一种简单、快速的测量方法。Prowse等^[42]通过系统评价发现在评估AIS患者姿势性不对称的廉价、简单测量方法中智能手机和脊柱侧凸测量仪有很高的证据等级,使用数学公式的脊柱侧凸测量仪与临床体格检查存在中度证据等级,AI、二维摄影等的证据等级有限。值得指出的是,部分人体测量学工具与智能手机App使用条件有限(如不能应用于佩戴支具的患者),但是可以作为放射影像检查的有益补充,两者结合应用可一定程度上减少患者辐射暴露。

4 小 结

基于传统影像的脊柱畸形参数测量虽然存在辐射暴露的问题,但仍是目前临床应用最广泛、最标准的测量方法。计算机及AI辅助有望提高脊柱畸形参数测量效率与精度,但尚处于起步阶段。EOS影像系统、三维超声和基于体表形态的参数测量在一定程度上减少或避免了辐射暴露,能够对脊柱侧凸畸形进行三维测量,然而其固有的局限如设备不易获得、成像系统复杂、需要专业技术人员操作等使其临床应用受限,仍需进一步研究。人体测量学工具与智能手机App在脊柱畸形群体筛查中有独特的优势,但是证据等级不高。目前在脊柱畸形参数测量方面还没有可以应用的指南或算法来指导测量方法的选择,但是未来测量工具的研发应该

向着安全无辐射、精确度与可信度高、技术简单、可操作性强、节约时间与成本、便于群体筛查与随访评估的方向发展,不同测量方法的优势互补、AI与新的成像技术等研究应用都有助于这一目标的实现。

[参 考 文 献]

- [1] POPE M H, STOKES I A, MORELAND M. The biomechanics of scoliosis[J]. *Crit Rev Biomed Eng*, 1984, 11: 157-188.
- [2] KAMTSIURIS P, ATZPODIEN K, ELLERT U, SCHLACK R, SCHLAUD M. [Prevalence of somatic diseases in German children and adolescents. Results of the German Health Interview and Examination Survey for Children and Adolescents (KiGG S)] [J]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 2007, 50(5/6): 686-700.
- [3] KONIECZNY M R, SENYURT H, KRAUSPE R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Child Orthop*, 2013, 7: 3-9.
- [4] RISSER J C. The classic: the iliac apophysis: an invaluable sign in the management of scoliosis. 1958[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468: 643-653.
- [5] PRUIJS J E, HAGEMAN M A, KEESSEN W, VAN DER MEER R, VAN WIERINGEN J C. Variation in Cobb angle measurements in scoliosis[J]. *Skeletal Radiol*, 1994, 23: 517-520.
- [6] MALFAIR D, FLEMMING A K, DVORAK M F, MUNK P L, VERTINSKY A T, HERAN M K, et al. Radiographic evaluation of scoliosis: review[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2010, 194(3 Suppl): S8-S22.
- [7] HWANG J H, HONG J Y, SUH S W, YANG J H, LEE J M. A comparative analysis of 4 curvature measurement methods in early-onset scoliosis[J/OL]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37: E1273-E1281. doi: 10.1097/BRS.0b013e318265a829.
- [8] NASH C L Jr, MOE J H. A study of vertebral rotation[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1969, 51: 223-229.
- [9] HO E K, UPADHYAY S S, CHAN F L, HSU L C, LEONG J C. New methods of measuring vertebral rotation from computed tomographic scans. An intraobserver and interobserver study on girls with scoliosis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1993, 18: 1173-1177.
- [10] WEISS H R. Measurement of vertebral rotation: Perdriolle versus Raimondi[J]. *Eur Spine J*, 1995, 4: 34-38.
- [11] SULLIVAN T B, REIGHARD F G, OSBORN E J, PARVARESH K C, NEWTON P O. Thoracic idiopathic scoliosis severity is highly correlated with 3D measures of thoracic kyphosis[J/OL]. *J Bone Joint Surg Am*, 2017, 99: e54. doi: 10.2106/J.BJS.16.01324.

- [12] SCHLÖSSER T P, SHAH S A, REICHARD S J, ROGERS K, VINCKEN K L, CASTELEIN R M. Differences in early sagittal plane alignment between thoracic and lumbar adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine J*, 2014, 14: 282-290.
- [13] DELORME S, LABELLE H, AUBIN C E. Is Cobb angle progression a good indicator in adolescent idiopathic scoliosis? [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27: E145-E151.
- [14] SIMONY A, HANSEN E J, CHRISTENSEN S B, CARREON L Y, ANDERSEN M O. Incidence of cancer in adolescent idiopathic scoliosis patients treated 25 years previously[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25: 3366-3370.
- [15] DIEFENBACH C, LONNER B S, AUERBACH J D, BHARUCHA N, DEAN L E. Is radiation-free diagnostic monitoring of adolescent idiopathic scoliosis feasible using upright positional magnetic resonance imaging? [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38: 576-580.
- [16] DUBOUSSET J, CHARPAK G, DORION I, SKALLI W, LAVASTE F, DEGUISE J, 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: 287-300.
- [17] DESCHÊNES S, CHARRON G, BEAUDOIN G, LABELLE H, DUBOIS J, MIRON M C, et al. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35: 989-994.
- [18] SOMOSKEÖY S, TUNYOGI-CSAPÓ M, BOGYÓ C, ILLÉS T. Clinical validation of coronal and sagittal spinal curve measurements based on three-dimensional vertebra vector parameters[J]. *Spine J*, 2012, 12: 960-968.
- [19] POST M, VERDUN S, ROUSSOULY P, ABELIN-GENEVOIS K. New sagittal classification of AIS: validation by 3D characterization[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28: 551-558.
- [20] CHUNG N, CHENG Y H, PO H L, NG W K, CHEUNG K C, YUNG H Y, et al. Spinal phantom comparability study of Cobb angle measurement of scoliosis using digital radiographic imaging[J]. *J Orthop Translat*, 2018, 15: 81-90.
- [21] REHM J, GERMANN T, AKBAR M, PEPKE W, KAUCZOR H U, WEBER M A, et al. 3D-modeling of the spine using EOS imaging system: inter-reader reproducibility and reliability[J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12: e0171258. doi: 10.1371/journal.pone.0171258.
- [22] SOMOSKEÖY S, TUNYOGI-CSAPÓ M, BOGYÓ C, ILLÉS T. 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: 1052-1059.
- [23] SUZUKI S, YAMAMURO T, SHIKATA J, SHIMIZU K, IIDA H. Ultrasound measurement of vertebral rotation in idiopathic scoliosis[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1989, 71: 252-255.
- [24] DARRIEUTORT-LAFFITE C, HAMEL O, GLÉMAREC J, MAUGARS Y, LE GOFF B. Ultrasonography of the lumbar spine: sonoanatomy and practical applications[J]. *Joint Bone Spine*, 2014, 81: 130-136.
- [25] LI M, CHENG J, YING M, NG B, ZHENG Y P, LAM T P, et al. Could clinical ultrasound improve the fitting of spinal orthosis for the patients with AIS? [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21: 1926-1935.
- [26] UNGI T, KING F, KEMPSTON M, KERI Z, LASSO A, MOUSAVI P, et al. Spinal curvature measurement by tracked ultrasound snapshots[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2014, 40: 447-454.
- [27] WANG Q, LI M, LOU E H, CHU W C, LAM T P, CHENG J C, et al. Validity study of vertebral rotation measurement using 3-D ultrasound in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2016, 42: 1473-1481.
- [28] LEE T T, JIANG W W, CHENG C L K, LAI K K, TO M K T, CASTELEIN R M, et al. A novel method to measure the sagittal curvature in spinal deformities: the reliability and feasibility of 3-D ultrasound imaging[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2019, 45: 2725-2735.
- [29] BRINK R C, WIJDICKS S P J, TROMP I N, SCHLÖSSER T P C, KRUYT M C, BEEK F J A, et al. A reliability and validity study for different coronal angles using ultrasound imaging in adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Spine J*, 2018, 18: 979-985.
- [30] HE C, TO M K, CHEUNG J P, CHEUNG K M, CHAN C K, JIANG W W, et al. An effective assessment method of spinal flexibility to predict the initial in-orthosis correction on the patients with adolescent idiopathic scoliosis (AIS) [J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12: e0190141. doi: 10.1371/journal.pone.0190141.
- [31] JIANG W W, CHENG C L K, CHEUNG J P Y, SAMARTZIS D, LAI K K L, TO M K T, et al. Patterns of coronal curve changes in forward bending posture: a 3D ultrasound study of adolescent idiopathic scoliosis patients[J]. *Eur Spine J*, 2018, 27: 2139-2147.
- [32] TABARD-FOUGÈRE A, BONNEFOY-MAZURE A, DHOUB A, VALAIKAITE R, ARMAND S, DAYER R. Radiation-free measurement tools to evaluate sagittal parameters in AIS patients: a reliability and validity study[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28: 536-543.
- [33] BOLLIGER S A, THALI M J, ROSS S, BUCK U, NAETHER S, VOCK P. Virtual autopsy using imaging: bridging radiologic and forensic sciences. A review of

- the Virtopsy and similar projects[J]. *Eur Radiol*, 2008, 18: 273-282.
- [34] CLIN J, AUBIN C É, PARENT S, LABELLE H. Biomechanical modeling of brace treatment of scoliosis: effects of gravitational loads[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2011, 49: 743-753.
- [35] LITTLE J P, RAYWARD L, PEARCY M J, IZATT M T, GREEN D, LABROM R D, et al. Predicting spinal profile using 3D non-contact surface scanning: changes in surface topography as a predictor of internal spinal alignment[J/OL]. *PLoS One*, 2019, 14: e0222453. doi: 10.1371/journal.pone.0222453.
- [36] GRANT C A, JOHNSTON M, ADAM C J, LITTLE J P. Accuracy of 3D surface scanners for clinical torso and spinal deformity assessment[J]. *Med Eng Phys*, 2019, 63: 63-71.
- [37] GOLDBERG C J, KALISZER M, MOORE D P, FOGARTY E E, DOWLING F E. Surface topography, Cobb angles, and cosmetic change in scoliosis[J/OL]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26: E55-E63. doi: 10.1097/00007632-200102150-00005.
- [38] PAPALIODIS D N, BONANNI P G, ROBERTS T T, HESHAM K, RICHARDSON N, CHENEY R A, et al. Computer assisted Cobb angle measurements: a novel algorithm[J/OL]. *Int J Spine Surg*, 2017, 11: 21. doi: 10.14444/4021.
- [39] PAN Y, CHEN Q, CHEN T, WANG H, ZHU X, FANG Z, et al. Evaluation of a computer-aided method for measuring the Cobb angle on chest X-rays[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28: 3035-3043.
- [40] WANG L, XU Q, LEUNG S, CHUNG J, CHEN B, LI S. Accurate automated Cobb angles estimation using multi-view extrapolation net[J/OL]. *Med Image Anal*, 2019, 58: 101542. doi: 10.1016/j.media.2019.101542.
- [41] FERRÀS-TARRAGÓ J, VALENCIA J M M, BELMAR P R, VERGARA S P, GÓMEZ P J, HERMIDA J L B, et al. Cobb angle measurement with a conventional convex echography probe and a smartphone[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28: 1955-1961.
- [42] PROWSE A, POPE R, GERDHEM P, ABBOTT A. Reliability and validity of inexpensive and easily administered anthropometric clinical evaluation methods of postural asymmetry measurement in adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25: 450-466.

[本文编辑] 杨亚红

