

·临床研究·

智能髋关节超声技术在婴儿发育性髋关节发育不良筛查中的应用

徐英¹, 于红奎¹, 林小影¹, 赵扬¹, 杨星怡¹, 黄子殷², 许晓²

(1. 深圳市宝安区妇幼保健院超声科, 广东 深圳 518133; 2. 深圳市开立生物医疗科技股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要:【目的】开发一种辅助发育性髋关节发育不良(DDH)的早期超声筛查的深度学习系统,即新型智能髋关节超声技术(S-hip),并验证其临床应用价值。【方法】选取我院自2021年11月至2022年8月通过标注和审核的婴儿髋关节冠状切面超声图像11 100张,其中8 100张图像用于训练集,3 000张用于测试集,用于构建S-hip深度学习系统。另采集87例婴儿双侧髋关节共174张标准冠状切面超声图像用于验证S-hip的自动测量与医生人工测量之间的一致性。S-hip、超声专家和住院医师分别测量 α 角、 β 角和FHC,分别记录测量数据和测量耗时,并进行统计学分析。另选取100张髋关节标准冠状切面超声图像,用于超声专家和超声住院医师测量者自身两次测量重复性验证。【结果】S-hip与超声专家测量 α 角、 β 角和FHC结果的组内相关系数(ICC)与95%可信区间(CI)分别是0.799(0.738, 0.847)、0.798(0.737, 0.846)和0.934(0.954, 0.975)。超声住院医师和超声专家测量 α 角、 β 角和FHC结果的ICC(95%CI)值分别是0.725(0.645, 0.789)、0.674(0.583, 0.748)和0.931(0.908, 0.949)。S-hip与超声专家测量 α 角、 β 角和FHC结果的平均绝对误差(MAE)分别是 2.69° 、 4.43° 和2.47%。S-hip组、超声专家组和超声住院医师组测量耗时分别(1.59 ± 0.36)s、(18.76 ± 2.23)s和(19.45 ± 2.76)s, S-hip自动测量耗时明显短于人工测量,差异有统计学意义($P<0.001$)。超声专家测量者自身两次测量 α 角、 β 角和FHC结果的ICC(95%CI)分别是0.943(0.916, 0.961)、0.959(0.940, 0.972)和0.981(0.971, 0.987),超声住院医师自身两次测量 α 角、 β 角和FHC结果的ICC(95%CI)分别是0.884(0.833, 0.921)、0.921(0.884, 0.946)和0.962(0.944, 0.974)。【结论】基于深度学习系统的新型智能髋关节超声技术(S-hip)自动测量 α 角、 β 角和FHC的可靠性和准确性都很高,优于超声住院医师,可以简化测量步骤,明显缩短检查时间,有利于婴儿髋关节超声筛查工作的广泛开展。

关键词: 婴儿;发育性髋关节发育不良;超声检查;深度学习;自动测量;筛查

中图分类号:R323.4;R445.1 文献标志码:A 文章编号:1672-3554(2023)05-0870-08

DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ.(med.sci).2023.0521

Smart Hip Ultrasound Technology in Screening for Infant Developmental Dysplasia of the Hip

XU Ying¹, YU Hong-kui¹, LIN Xiao-ying¹, ZHAO Yang¹, YANG Xing-yi¹, HUANG Zi-yin², XU Xiao²

(1. Department of Ultrasound, Shenzhen Bao'an District Maternal and Child Health Hospital, Shenzhen 518133, China;

2. Shenzhen Kaili Biomedical Technology Co., Shenzhen 518057, China)

Correspondence to: YU Hong-kui; E-mail: yhk20@163.com

Abstract:【Objective】To develop a deep learning system for early ultrasound screening of developmental dysplasia of the hip (DDH), a new smart-hip ultrasound technique (S-hip), and to validate its clinical application.【Methods】We selected 11,100 annotated and reviewed coronal ultrasound images of infant hips between November 2021 and August 2022,

收稿日期:2023-04-20

基金项目:深圳市科创委基础研究面上项目(JCYJ20210324134203010)

作者简介:徐英,第一作者,副主任医师,研究方向:小儿和妇产超声诊断,E-mail: 50469365@qq.com;于红奎,通信作者,医学博士,主任医师,E-mail: yhk20@163.com

8,100 of which were used for the training set and 3,000 for the test set, to build a S-hip deep learning system. To verify the consistency between the automated measurement by S-hip and the manual measurements by sonographers, 174 standard coronal ultrasound images of 87 infants' bilateral hips were acquired, then α angle, β angle and femoral head coverage (FHC) were measured by S-hip, an ultrasound expert and a resident. The measurement data and the time required for the measurements were recorded and statistically analyzed. Another 100 standard coronal ultrasound images of the hips were randomly selected and measured twice respectively by the ultrasound expert and resident to assess the intra-sonographer repeatability.【Results】The intraclass correlation coefficient (ICC) (95% CI) values of α angle, β angle and FHC results measured by S-hip and ultrasound expert were 0.799 (0.738, 0.847), 0.798 (0.737, 0.846) and 0.934 (0.954, 0.975), respectively. Those values measured by the ultrasound expert and resident were 0.725 (0.645, 0.789), 0.674 (0.583, 0.748) and 0.931 (0.908, 0.949), respectively. The mean absolute errors (MAE) of α angle, β angle and FHC results between measurements by S-hip and ultrasound expert were 2.69° , 4.43° and 2.47%, respectively. The time required for measurements by S-hip, ultrasound expert and resident was (1.59 ± 0.36) s, (18.76 ± 2.23) s and (19.45 ± 2.76) s, respectively. The automated measurement by S-hip cost much shorter time than the manual measurements by sonographers and the difference was statistically significant ($P<0.001$). The ICC (95% CI) values of α angle, β angle and FHC results between two measurements by the ultrasound expert were 0.943 (0.916, 0.961), 0.959 (0.940, 0.972), and 0.981 (0.971, 0.987), respectively. Those values by the ultrasound resident were 0.884 (0.833, 0.921), 0.921 (0.884, 0.946), and 0.962 (0.944, 0.974).【Conclusion】The S-hip based on a deep learning system is a highly reliable automated technique to accurately measure α angle, β angle and FHC. Compared with ultrasound residents, S-hip allows for a more simplified and significantly quicker measurement, which may enhance the widespread use of hip ultrasound screening in infants.

Key words: infant; developmental dysplasia of the hip (DDH); ultrasonography; deep learning; automated measurement; screening

[J SUN Yat-sen Univ (Med Sci), 2023, 44(5): 870-877]

发育性髋关节发育不良 (developmental dysplasia of the hip, DDH) 是一种常见的婴幼儿骨科疾病, 包括髋臼发育不良、髋关节半脱位和完全脱位, 发病率约 0.1% ~ 3%^[1-3], 不同地区间有较大的差异性。如果不及时治疗, DDH 会导致早期髋关节不稳定, 继续进展可引起继发性脊柱畸形, DDH 早期未及时发现是 60 岁以下髋关节置换术最常见的原因之一^[4]。因此, 早期对婴儿进行 DDH 筛查对改善该病的预后至关重要^[5-6], 而超声检查是年龄在 6 个月以内的婴儿 DDH 早期最普遍且最有用的影像诊断方法^[7], 但是受操作者工作经验和手法的影响, 超声检查的结果主观性较大。随着人工智能尤其是深度学习技术的快速发展, 在医学影像学方面的应用越来越广泛^[8-10], 卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNN) 是一种常见的深度学习模型, CNN 在完成各类图像任务时具有非常好的优越性, 本研究利用 CNN 技术构建一种深度学习系统——新型智能髋关节超声技术 (smart-hip, S-hip), 并验证 S-hip 自动测量婴儿髋关节的可靠性和准确性。

1 材料与方法

1.1 研究对象

回顾性分析深圳市宝安区妇幼保健院 2 164 例婴儿双侧髋关节超声视频资料, 婴儿年龄 14 ~ 180 d, 平均 (42.3 ± 26.1) d。纳入标准: ①出生后 14 ~ 180 d 在我院儿童保健科行发育性髋关节发育不良筛查的婴儿。②图像及临床资料齐全。排除标准: ①根据儿童保健科医生判断为患有不适合参加本研究的疾病的患儿; ②根据 Graf 检查法^[11]判断为 II 型以上病理性髋关节患儿。本研究通过了深圳市宝安区妇幼保健院医院医学研究伦理委员会的批准 (20210113), 因回顾性研究匿名婴儿髋关节超声影像, 因此未签署知情同意书。

1.2 仪器和检查方法

1.2.1 仪器 采用开立 P60 彩色多普勒超声诊断仪, 探头型号 9L-A, 频率 2~11 MHz。

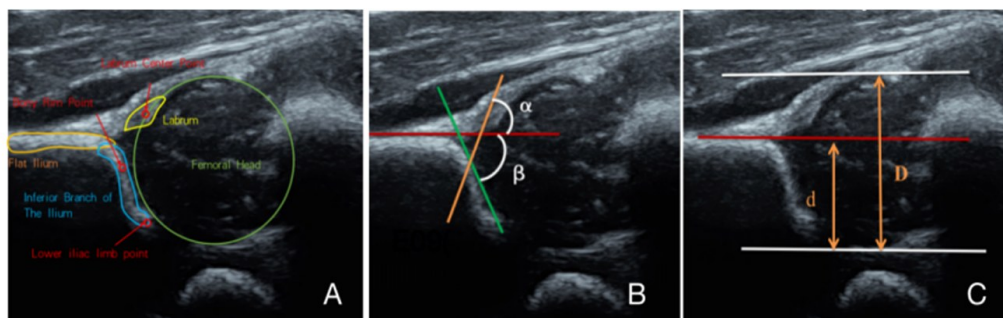
1.2.2 超声检查方法 选取 2 164 例婴儿双侧髋关节共 4 328 段超声视频资料, 从视频中选取 4 328 帧

髋关节标准冠状切面和8 656帧非标准冠状切面的图像,共12 984张超声图像。标准切面^[12]需要显示清晰的解剖结构包括:软骨-骨交界、股骨头、滑膜皱襞、关节囊、孟唇、软骨性髋臼顶、平直髌骨外缘、骨缘转折点、髌骨支下缘。上述任何一种解剖结构没有显示或是显示不清,都不能作为标准声像图。按照 Graf 法^[11]在髋关节标准冠状切面测量 α 角、 β 角(图 1B),以平直的髌骨外缘切线为基线,以髌骨支下缘点和骨性髋臼顶的切线为骨顶线,以骨缘转折点和孟唇中心点的连线为软骨顶线,再测量 α 角(骨顶线与基线的夹角)、 β 角(软骨顶线与基线的夹角)。按照 Terjesen 法^[13]测量股骨头覆盖率(femoral head-coverage, FHC),FHC(图 1C)是以股骨头内缘至基线的距离与股骨头内、外侧缘距离的比例,以平直的髌骨外缘切线为基线(相当于 Graf 法

的基线),测量股骨头内缘切线与基线的间距记为 d ,测量股骨头内、外侧缘切线的间距记为 D ,计算两者的比值即为FHC, $FHC=(d/D)\times 100\%$ 。

1.3 构建深度学习系统——S-hip

1.3.1 建立数据集 标注小组通过影像 SonoKit 标注软件按照统一的标准标注12 984张超声图像,髋关节标准冠状切面标注内容(图 1A)包括:3个分割解剖结构的轮廓,分别是平直的髌骨、髌骨下支和孟唇;3个点分别是髌骨支下缘点、骨缘转折点和孟唇中心点;股骨头内、外侧之间的直径(圆的内径)。通过2名经过专业培训具有10年以上髋关节超声检查经验的超声专家审核,共11 100张通过审核的图像形成数据集,构建深度学习系统,其中8 100张用于训练和优化深度学习系统,另外3 000张用于测试深度学习系统。



A: the labeling includes: the outline of 3 segmented anatomical structures, which are the flat ilium, inferior branch of the ilium, and the labrum; the 3 points are the lower iliac limb point, the bony rim point and the labrum center point; the diameter of the femoral head between the medial and lateral margins; B: schematic diagrams of the measurement of α -angle and β -angle, with the horizontal red line being the baseline, the green line being the bony apex line, and the yellow line being the cartilage apex line; C: schematic diagrams of the measurement of the FHC, with the horizontal red line is the baseline, $FHC=(d/D)\times 100\%$ (d : spacing between the tangent line of the medial margin of the femoral head and the baseline; D : spacing between the tangent lines of the medial and lateral margins of the femoral head).

图1 髋关节超声检查图像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hip joint ultrasound examination

1.3.2 网络构架 ①标准面提取网络(图2)由分类主干网络和分类头部网络组成。当传入一段视频流时,图像会逐帧输入到由 ResNet-50^[14]组成的主干网络进行特征提取,之后将提取的特征经过池化层和全连接层的计算得到最后的分数。通过对视频中各帧分数的对比,可以获得该视频中的最标准帧。②自动测量模型(图3)由编码器-解码器结构、关键点检测头和分割头组成。参考 U-Net^[15]编码器-解码器结构网络,当图像经过编码器时,通过多次下采样,扩大感受野,学习到图像的整体特征;而解码器则是通过反卷积以及特征拼接等操作,恢

复图像的一些细节特征,最终生成初步的特征图。该特征图随后分别输入到两个头部网络,其中关键点检测头部网络主要由卷积层、批归一化层、ReLU^[16]层等组成,主要用于提取图像中所学关键点的特征,输出具体位置;而分割头部网络也是由类似的元素构成,但它主要负责学习图像的组织结构特征,输出各个关键结构的轮廓。

1.4 验证深度学习系统(S-hip)的准确性、可靠性和易用性

由1名经过专业培训具有10年以上髋关节超声检查经验的超声专家采集87位婴幼儿共174张

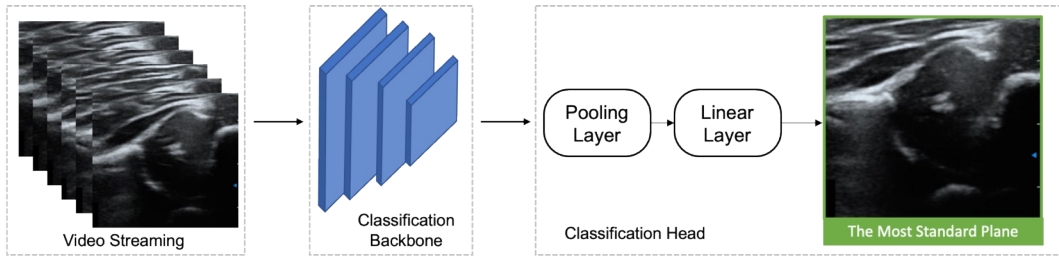


图2 通过卷积神经网络ResNet实现自动标准切面识别

Fig. 2 Automatic standard cut recognition by convolutional neural network ResNet

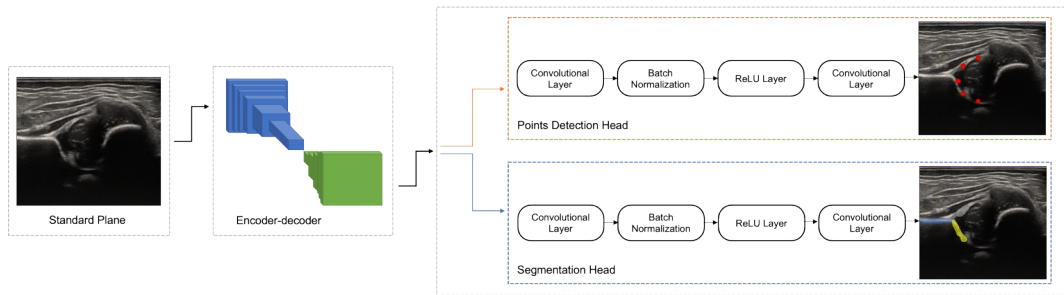


图3 通过编码器-解码器结构、关键点检测和网络分割形成自动测量系统

Fig. 3 Automatic measurement system through encoder-decoder structure, key point detection and network segmentation

髋关节标准冠状切面图像,同时接受超声专家、S-hip及超声住院医师的测量 α 角、 β 角和FHC,对不同测量者之间的测量数据进行一致性分析,不同医生之间的测量采用双盲法,分别记录三者测量耗时。

另应用随机数字法选取髋关节标准冠状切面图像100张,超声专家和超声住院医师分别测量2次,比较观察者间测量数据的一致性。

1.5 统计方法

应用SPSS 20.0及MedCalc软件进行统计分析。计量资料进行正态分布检验,符合正态分布的以均数 \pm 标准差表示。并利用组内相关系统(intraclass correlation coefficient, ICC)分别对S-hip、超声住院医师与超声专家测量 α 角、 β 角和FHC结果进行一致性分析,并报告95%可信区间(confidence interval, CI),同时绘制Bland-Altman图评估S-hip分别与超声专家和超声住院医师测量数据的一致性,用平均绝对误差(mean averaged errors, MAE)来评估测量者之间的测量偏差。

2 结果

2.1 S-hip和超声专家测量结果的比较

S-hip和超声专家测量婴儿髋关节 α 角差异无

统计学意义($P>0.05$),两者测量 β 角和FHC差异有统计学意义($P<0.05$)。S-hip和专家分别测量 α 角、 β 角和FHC结果的MAE分别为 2.69° 、 4.43° 和2.47%(表1)。

2.2 S-hip、超声住院医师和超声专家测量结果的一致性比较

S-hip和超声专家测量婴儿髋关节 α 角、 β 角和FHC结果的一致性都比较高,ICC分别是0.799、0.798和0.934;S-hip和住院医师测量婴儿髋关节 α 角、 β 角和FHC结果的ICC分别是0.757、0.742和0.925;超声住院医师和超声专家测量婴儿髋关节 α 角、 β 角和FHC结果的ICC分别是0.725、0.674和0.931(表2)。Bland-Altman图(图4和图5)示S-hip与超声专家和超声住院医师的测量一致性较好,95%一致性界限外的点均 $<7\%$,且S-hip与超声专家测量 α 角、 β 角差值均数小于S-hip与超声住院医师的测量差值均数。

2.3 测量者自身两次测量观察者内部一致性分析

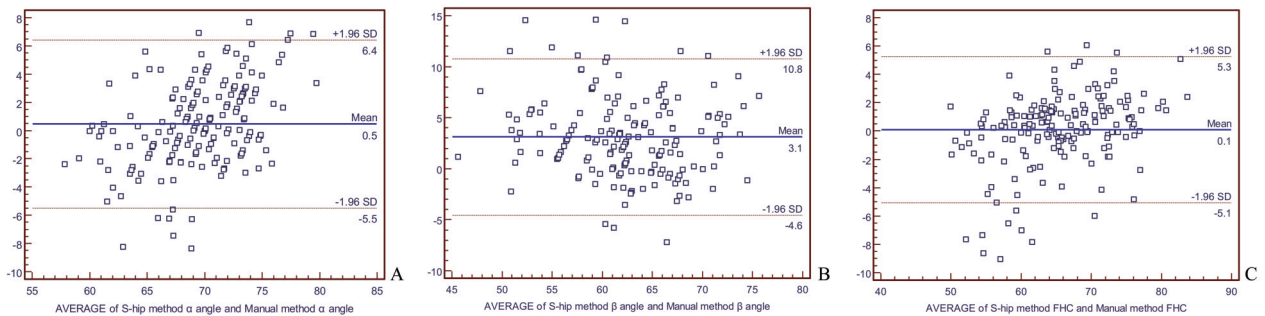
对于同一张图重复测量,S-hip测量的一致性最好,ICC是1。超声专家和超声住院医师自身测量两次的ICC分别是0.943、0.884,超声专家自身两次重复测量的一致性优于住院医师(表3)。

表1 S-hip与超声专家测量结果对比
Table 1 Comparison of S-hip and ultrasound expert measurements

Group(n=174)	α angle/ $^{\circ}$	β angle/ $^{\circ}$	FHC/%
S-hip	69.74 \pm 5.12	63.71 \pm 6.42	65.59 \pm 7.76
Expert	69.55 \pm 3.77	61.56 \pm 5.13	64.85 \pm 6.99
<i>t</i>	0.682	5.257	2.894
<i>P</i>	0.496	0.000	0.004
MAE	2.69	4.43	2.47

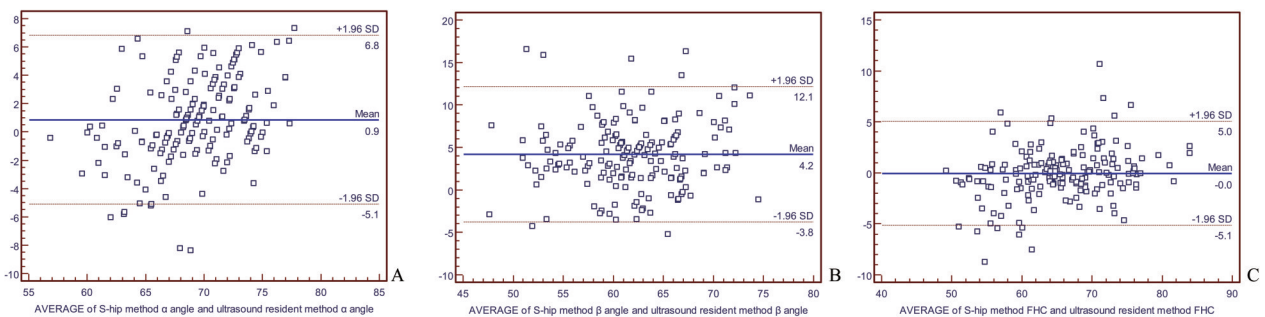
表2 S-hip、超声住院医师和超声专家测量结果的一致性
Table 2 ICC between S-hip, ultrasound resident and ultrasound expert measurements

Group(n=174)	α angle/ $^{\circ}$		β angle/ $^{\circ}$		FHC/%	
	ICC	95%CI	ICC	95%CI	ICC	95%CI
Resident and expert	0.725	(0.645, 0.789)	0.674	(0.583, 0.748)	0.931	(0.908, 0.949)
Resident and S-hip	0.757	(0.685, 0.815)	0.742	(0.666, 0.803)	0.925	(0.900, 0.944)
S-hip and expert	0.799	(0.738, 0.847)	0.798	(0.737, 0.846)	0.934	(0.954, 0.975)



A: Bland-Altman plots of S-hip and expert measurement of α -angle; B: Bland-Altman plots of S-hip and expert measurement of β -angle; C: Bland-Altman plots of S-hip and expert measurement of FHC.

图4 S-hip和超声专家的测量Bland-Altman图
Fig. 4 Bland-Altman plots of S-hip and ultrasound expert measurement



A: Bland-Altman plots of S-hip and ultrasound resident measurement of α -angle; B: Bland-Altman plots of S-hip and ultrasound resident measurement of β -angle; C: Bland-Altman plots of S-hip and ultrasound resident measurement of FHC.

图5 S-hip和超声住院医师的测量Bland-Altman图
Fig. 5 Bland-Altman plots of S-hip and ultrasound resident measurement

表3 超声专家和超声住院医师自身测量两次结果一致性分析
Table 3 ICC of two measurements by ultrasound expert and ultrasound resident themselves

Group (n=100)	α angle/ $^{\circ}$		β angle/ $^{\circ}$			FHC/%
	ICC	95%CI	ICC	95%CI	ICC	95%CI
Expert	0.943	(0.916, 0.961)	0.959	(0.940, 0.972)	0.981	(0.971, 0.987)
Resident	0.884	(0.833, 0.921)	0.921	(0.884, 0.946)	0.962	(0.944, 0.974)

2.4 S-hip、住院医师和专家测量耗时比较

超声专家和住院医师使用开立彩超诊断仪的自带的小儿髋关节半自动测量工具包测量,测量三

个指标的耗时分别需要 18.76 s、19.45 s,而S-hip只需要一键获取,平均耗时少于 2 s,人工智能测量耗时明显缩短(表4)。

表4 S-hip、超声住院医师和超声专家测量耗时比较
Table 4 Comparison of measurement elapsed time between S-hip, ultrasound resident and expert ($\bar{x} \pm s$)

Measurement elapsed time (n=174)	S-hip	Expert	Resident
Elapsed time/s	1.59±0.36a	18.76±2.23b	19.45±2.76c

One-way repeated-measures ANOVA, $F=8679.670$, $P<0.001$. marked with different letters (a, b, c) indicates statistically significant difference between groups ($P<0.05$).

3 讨论

DDH 的治疗原则是早期诊断和尽早干预,早期保守治疗可以有效的避免手术切开复位^[17]。患儿出生至 6 个月是保守治疗的黄金时间,因为股骨头尚未完成骨化,6 个月以内的婴儿髋关节主要由软骨构成,超声是评估髋关节发育情况的首选检查。目前应用最广泛是基于髋关节冠状位的 Graf 方法^[12],能够量化评估髋臼的发育情况。Terjesen^[13]提出了股骨头覆盖率(femoralhead-coverage, FHC),可以简单、快速评价患儿是否存在髋关节脱位,对 Graf 法有补充作用。因此,Graf 法的 α 、 β 角和 Terjesen 法的 FHC 测量被广泛地应用于髋关节超声检查^[18-19]。因为各地的医疗资源参差不齐,国内还未开展对所有地区婴儿行髋关节超声筛查的工作。

超声检查受工作经验和操作手法等因素的影响,不同医生测量结果的重复性和可靠性较差,这一直都是婴儿髋关节超声检查存在的问题^[20-22]。随着技术的快速发展,人工智能深度学习在医学影像学方面显示出巨大的潜力,目前在超声方面应用

最广泛的模型包括卷积神经网络、深度置信网络、循环神经网络等,可用于实现超声图像的分割、检测、分类、配准等任务,其中卷积神经网络的应用最为普遍。目前卷积神经网络已经被应用于乳腺癌、肺癌、甲状腺结节等疾病的诊断^[8,10],能够提升影像诊断的客观性和准确率,但在 DDH 中的应用报道较少。

Oelen 等^[23]在 2020 年的一项研究中利用卷积神经网络构建的深度学习算法自动测量和医生手动测量髋关节 α 角,医生的测量误差是 7.1 $^{\circ}$,而基于深度学习的算法测量误差是 3.9 $^{\circ}$,该研究显示基于深度学习的算法比受过训练的医生具有更高的准确性和一致性。Lee 等^[24]利用 1243 张髋关节图像建立的模型与专家的测量 α 、 β 角结果对比的 ICC 分别是 0.764、0.743,本研究基于 11 100 张婴儿髋关节超声图像建立的人工智能深度学习系统(S-hip)与超声专家相比,自动测量 α 角、 β 角和 FHC 结果的 ICC 值分别是 0.799、0.798 和 0.934,均大于 0.79, Bland-Altman 图一致性好,说明测量结果的一致性都比较高,较之前的模型具有更好的一致性。而超声住院医师和超声专家测量婴儿髋关节 α 角、 β 角和 FHC 结果的 ICC 值分别是 0.725、0.674

和0.931,与住院医师相比,人工智能与专家的一致性优于住院医师。本研究建模的数据来源涵盖了所有早期超声筛查年龄段婴儿的髋关节,图像数量更大,模型更具有临床应用价值。超声专家和住院医师对于同一图像自身两次测量结果的ICC分别是0.943,0.884,而S-hip自身测量两次的ICC是1,一致性和重复性更好。S-hip除了Graf法的 α 、 β 角的测量之外,还补充了临床常用Terjesen法的FHC,更有利于临床工作的应用。

本研究用平均绝对误差(MAE)来评估S-hip和专家测量结果之间的偏差,S-hip和超声专家相比,测量 α 角、 β 角和FHC结果的MAE分别是 2.69° 、 4.43° 和2.67%,比之前的人工智能模型表现更加地优异, Lee等^[24]在2021年的一项研究中对比髋关节人工智能模型与专家,测得 α 角、 β 角的MAE分别是 3.4° 和 4.5° 。本研究中增加了FHC的测量方法,更能满足临床需求,无论是S-hip还是住院医师,与超声专家对比,FHC测量结果一致性都非常好,ICC均大于0.9。

相对于依靠医生手工测量角度繁琐的步骤,人工智能深度学习系统只需要在检查过程中一键触屏“S-hip”,就可以得到测量结果,明显缩短测量时间,Huang^[25]的研究中有经验的超声专家人工手动测量所需时间41.4 s,本研究中使用的开立P60彩超诊断仪自带的半自动测量软件,经验丰富的超声专家仍需要18.76 s,所花费的时间是S-hip测量耗时的10倍以上。人工智能深度学习系统(S-hip)能够提高超声医师筛查DDH的工作效率和准确性,避免人为误差造成结果的差异,提高工作效率。

本研究存在一定的局限性,在建立数据集的过程中排除了Graf II型以上的病理性髋关节超声图像,缺乏对病理性髋关节的超声图像特征的深度学习,今后将对这类疾病进行相关的研究。

综上所述,基于深度学习系统的新型智能髋关节超声技术(S-hip)自动测量 α 角、 β 角和FHC的可靠性和准确性都很高,可以简化超声医生操作步骤,明显缩短检查时间,有利于婴儿髋关节超声筛查工作的广泛开展。

参考文献

- [1] Kang YR, Koo J. Ultrasonography of the pediatric hip and spine [J]. Ultrasonography, 2017, 36(3): 239-251.
- [2] Chen T, Zhang Y, Wang B, et al. Development of a fully automated graf standard plane and angle evaluation method for infant hip ultrasound scans [J]. Diagnostics (Basel), 2022, 12(6): 1423.
- [3] Chand S, Aroojis A, Pandey RA, et al. The incidence, diagnosis, and treatment practices of developmental dysplasia of hip (DDH) in India: a scoping systematic review [J]. Indian J Orthop, 2021, 55(6): 1428-1439.
- [4] Roposch A, Liu LQ, Hefti F, et al. Standardized diagnostic criteria for developmental dysplasia of the hip in early infancy [J]. Clin Orthop Relat Res, 2011, 469(12): 3451-3461.
- [5] 中华医学会小儿外科分会骨科学组, 中华医学会骨科学分会小儿创伤矫形学组. 发育性髋关节发育不良临床诊疗指南(0~2岁) [J]. 中华骨科杂志, 2017, 37(11): 641-650. Orthopaedic Group of the Chinese Medical Association Pediatric Surgery Branch, Pediatric Trauma and Orthopaedics Group of the Chinese Medical Association Orthopaedic Branch. Clinical diagnosis and treatment guidelines for developmental hip dysplasia (0~2 years old) [J]. Chin J Orthopaed, 2017, 37(11): 641-650.
- [6] Vaquero-Picado A, González-Morán G, Garay EG, et al. Developmental dysplasia of the hip: update of management [J]. EFORT Open Rev, 2019, 4(9): 548-556.
- [7] 于静森, 陈涛, 吕学敏. 《AIUM-ACR-SPR-SRU发育性髋关节发育不良超声检查实践参考(2018版)》解读 [J]. 骨科临床与研究杂志, 2019, 4(1): 61-62. Yu JM, Chen T, Lv XM. Interpretation of the AIUM-ACR-SPR-SRU practice reference for ultrasonography in developmental hip dysplasia (2018 edition) [J]. J Orthopaed Clin Res, 2019, 4(1): 61-62.
- [8] Zhang X, Lee VC, Rong J, et al. Deep convolutional neural networks in thyroid disease detection: a multi-classification comparison by ultrasonography and computed tomography [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 220: 106823.
- [9] Soffer S, Ben-Cohen A, Shimon O, et al. Convolutional neural networks for radiologic images: a radiologist's guide [J]. Radiology, 2019, 290(3): 590-606.
- [10] Eroglu Y, Yildirim M, Çinar A. Convolutional Neural Networks based classification of breast ultrasonography images by hybrid method with respect to benign, malignant, and normal using mRMR [J]. Comput Biol Med, 2021, 133: 104407.
- [11] Graf R. Fundamentals of sonographic diagnosis of infant hip

- dysplasia[J]. *J Pediatr Orthop*, 1984, 4(6): 735-740.
- [12] 于静森, 吕学敏, 陈涛, 等. 发育性髋关节发育不良超声检查指南质量控制要点分析[J/OL]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2021, 18(7): 634-637.
- Yu JM, Lv XM, Chen T, et al. Analysis of quality control points in ultrasound guidelines for developmental hip dysplasia [J/OL]. *Chin J Ultras Med (elec ver)*, 2021, 18(7): 634-637.
- [13] Terjesen T, Bredland T, Berg V. Ultrasound for hip assessment in the newborn[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1989, 71(5): 767-773.
- [14] Yu X, Kang C, Guttery DS, et al. ResNet-SCDA-50 for Breast Abnormality Classification[J]. *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform*, 2021, 18(1): 94-102.
- [15] Wang L, Li R, Zhang C, et al. UNetFormer: a UNet-like transformer for efficient semantic segmentation of remote sensing urban scene imagery [J]. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2022, 190(8): 196-214.
- [16] Han Z, Yu S, Lin SB, et al. Depth Selection for Deep ReLU Nets in Feature Extraction and Generalization[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2022, 44(4): 1853-1868.
- [17] Schaeffer EK, Study Group I, Mulpuri K. Developmental dysplasia of the hip: addressing evidence gaps with a multicentre prospective international study [J]. *Med J Aust*, 2018, 208(8): 359-364.
- [18] Gunay C, Atalar H, Dogruel H, et al. Correlation of femoral head coverage and Graf alpha angle in infants being screened for developmental dysplasia of the hip [J]. *Int Orthop*, 2009, 33(3): 761-764.
- [19] 区薛宜, 吴苑, 丘玲, 等. 超声 Graf 法联合 Harcke 法、Terjesen 法在婴幼儿发育性髋关节发育不良中的应用价值 [J]. *广州医科大学学报*, 2019, 47(2): 40-43.
- Ou XY, Wu Y, Qiu L, et al. Ultrasound studies on developmental dysplasia of the hip in infants with combined use of Graf, Harcke, and Terjesen approaches [J]. *Academ J Guangzhou Med Univ*, 2019, 47(2): 40-43.
- [20] Graf R. Hip sonography: background; technique and common mistakes; results; debate and politics; challenges [J]. *Hip Int*, 2017, 27(3): 215-219.
- [21] Sari AS, Karakus O. Is experience alone sufficient to diagnose developmental dysplasia of the hip without the bony roof (alpha angle) and the cartilage roof (beta angle) measurements? a diagnostic accuracy study [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2020, 99(14): e19677.
- [22] Karakus O, Karaman O, Sari AS, et al. Is it difficult to obtain inter-observer agreement in the measurement of the beta angle in ultrasound evaluation of the paediatric hip? [J]. *J Orthopaed Surg Res*, 2019, 14(1): 221.
- [23] Oelen D, Kaiser P, Baumann T, et al. Accuracy of trained physicians is inferior to deep learning-based algorithm for determining angles in ultrasound of the newborn hip [J]. *Ultraschal Med*, 2020, 43(5): e49-e55.
- [24] Lee SW, Ye HU, Lee KJ, et al. Accuracy of new deep learning model-based segmentation and key-point multi-detection method for ultrasonographic developmental dysplasia of the hip (DDH) screening [J]. *Diagnostics*, 2021, 11(7): 1174.
- [25] Huang B, Xia B, Qian J, et al. Artificial intelligence-assisted ultrasound diagnosis on infant developmental dysplasia of the hip under constrained computational resources [J]. *J Ultrasound Med*, 2023, 42(6): 1235-1248.

(编辑 余菁)