

· 综 述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2021.15.036

网络首发 <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20210330.1322.008.html>(2021-03-31)

人工智能在超声自动定量左心容积与功能中的应用进展*

吴妮懋^{1,2}综述,任建丽^{1,2△}审校

(1. 重庆医科大学超声影像学研究所,重庆 400010;2. 重庆医科大学附属第二医院超声科,重庆 400010)

[摘要] 人工智能(AI)通过建立机器学习模型开发的自动定量分析软件可以快速、准确量化心室容积与射血分数,提高医师的诊断效率和测量的可重复性,使三维超声有望在临床常规使用。本文围绕 AI、自动定量技术与心脏容积和射血分数的量化等方面作一综述。

[关键词] 人工智能;自动定量技术;三维超声心动图;容积与功能

[中图分类号] R445.1;TP18 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2021)15-2690-05

Application progress of artificial intelligence in ultrasound automatic quantification of left cardiac volume and function*

WU Nimao^{1,2}, REN Jianli^{1,2△}

(1. Institute of Ultrasound Imaging, Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China; 2. Department of Ultrasound, Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

[Abstract] The automatic quantitative analysis software developed by artificial intelligence (AI) via establishing the machine learning model can rapidly and accurately quantize the ventricular volume and ejection fraction, improve the diagnostic efficiency and measurement repeatability. AI makes the three-dimensional echocardiography to be expected to routinely use in clinic. This article reviewed the aspects of AI, automatic quantitative techniques and quantification of cardiac volume and ejection fraction.

[Key words] artificial intelligence; automatic quantification technology; three-dimensional echocardiography; volume and function

心脏容积与功能一直是心血管疾病患者早期诊断、疾病监测和预后评估的重要指标,超声心动图因快捷、安全、动态等优势已成为临床最应用于定量评估左心功能的影像学技术。二维超声心动图(2DE)因几何假设和心尖短缩等缺陷常导致容积与功能测量的不准确,传统三维超声心动图(3DE)需要采集多个心动周期,且人工勾勒心内膜边界存在耗时、复杂、变异性大等局限性,尚未在临床普及。随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的开发和应用,三维全自动定量分析技术可实现一键定量心脏容积与功能,有望解决上述困难,使 3DE 尽快在临床普及。

1 AI 的基本概念

AI 是计算机科学的一个分支,其中机器学习是

AI 的核心,是使计算机具有智能的根本途径。机器学习主要分为有监督学习、无监督学习模式,二者的主要区别是机器接收的数据是否带有标记^[1]。目前应用于医学影像学的学习模式主要包括监督学习中的递归神经网络、卷积神经网络和普通深度神经网络等主流模型,其中卷积神经网络^[2]作为具有自主学习能力的神经网络模型,是目前医学影像学 AI 的研究热点。卷积神经网络模型可从多层结构中提取其最具辨识度的特征,进而识别不同类型的超声图像,此技术是目前超声医学前沿研究的核心。

2 AI 在心脏超声中的基本应用

众所周知,心脏超声检查需要多切面扫查及大量数据采集,是一项复杂、耗时的检查程序。将 AI 与高

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81873901)。 作者简介:吴妮懋(1995—),在读硕士研究生,主要从事心血管超声诊断研究。

△ 通信作者, E-mail: renjianli_1977@163.com。

度依赖机器操作的医学超声影像学融合,利用机器学习技术“学习”庞大的原始数据库中超声图像的不同特征,从而识别图像,量化感兴趣区域及识别疾病类型,其客观的判断对于弥补这些不足具有巨大的优势^[3]。

目前机器学习在超声心动图中的应用尚处于早期阶段,主要通过开发智能程序进行超声图像的自动识别、病理分类、部分心脏疾病诊断,以及心腔结构、容积和功能的自动量化。一项研究证实^[4],机器学习算法可精确识别心尖四腔心、二腔心和三腔心切面,其中监督学习模型成功识别 3 种心尖视图的准确率约为 95%。国外有研究发现,通过深度学习方法建立的心肌梗死诊断模型其受试者工作特征曲线下面积(AUC)值高于人工诊断,且除左前降支以外,机器学习模型对右冠状动脉、左回旋支及健康对照组的分类错误率较低^[5]。SENGUPTA 等^[6]应用机器学习算法对缩窄性心包炎和限制性心肌病进行了区分。ZHANG 等^[7]还建立了一种基于深度学习方法的机器学习模型,可以从胸骨旁长轴视图中区分心肌病和肺动脉高压。

3 自动定量技术在左心容积与功能分析中的应用

心脏容积与功能的量化是心脏超声检查的重要组成部分。双平面圆盘总和技术量化左心室容积和射血分数存在显著的变异性。三维超声全自动定量技术运用了 AI 技术的机器学习模型,无需人工操作(如选择视图、定位标记和修改边界)即可获得定量结果,消除了专家和新手之间的差距,提高了测量的再现性^[8]。目前临床上使用此类软件主要针对左心室(left ventricular, LV)及左心房(left atrium, LA)进行容积与功能的定量分析。

3.1 二维自动定量左心容积与功能

左心室容积和左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)最早是通过 M 型(二维)超声心动图进行测量,但 M 型超声要求在标准切面上进行测值,且无法逐帧分析图像,常导致测量误差。目前临床测量心脏腔室大小和功能依旧常规使用 2DE,除了几何假设及心尖短缩的缺点,在二维平面上手动测值依旧具有主观和耗时的局限性。当下,市面上发行了多种自动测量二维左心室射血分数(2D-LVEF)的软件,如西门子的 eSie LVA(德国慕尼黑)、TomTec 的 AutoLV(德国慕尼黑)、飞利浦的 a2DQAI(荷兰贝斯特)。多项研究证实,自动定量 2D-LVEF 的可行性为 83%~100%,提高了 2D-LVEF 测量的准确性和再现性,其测量结果与磁共振成像(MRI)结果一致性好^[9-11],且

与半自动^[12]、手动甚至心脏核磁共振成像(CMR)^[9-10,13]方法相比,至少可节省 50% 以上的分析时间。一项多中心研究中,KNACKSTEDT 等^[14]应用机器学习算法的软件包(AutoLV, TomTec-Arena 1.2, TomTec Imaging Systems, Unterschleissheim, 德国)对 255 例患者进行 2D-LVEF、LV 容积和整体纵向应变测量,结果与使用二维双平面技术的手动追踪测值相关性好,但相关性结果受到图像质量的影响。临床可对于图像质量优秀的患者直接使用自动测量的二维容积与 LVEF。

3.2 三维自动定量左心容积与功能

三维左心室射血分数(3D-LVEF)比 2D-LVEF 更准确,其复测的变异性几乎只有 2D-LVEF 的一半^[15],指南建议临床可在图像质量较好的患者中常规使用 3D-LVEF^[16]。但由于传统 3DE 需手动勾勒心内膜边界,分析时间较长且要求操作者有一定的三维经验^[17],现阶段 3DE 并未能替代 2DE 成为心脏容积和功能的常规检测方法。三维自动化分析克服了上述限制,有望满足当前医疗环境对于快速、准确量化心室容积与功能的急迫需求。

三维自动定量技术主要运用基于大数据“知识库”的概率轮廓算法^[10]或自适应分析算法^[18]对心内膜边界进行自动追踪。最初开发的三维心内膜边界探测算法尚属于半自动化,需要人工标注部分重要解剖位置(如二尖瓣环、LV 心尖或 LA 顶点),其中包括 TomTec 4D LV(德国 TomTec 公司)、QLab 3DQA(荷兰飞利浦公司)和 GE 4D LVQ(美国 GE 公司)等。目前以完全自动化测量发行的软件仅限于德国西门子公司 eSie LVA 和荷兰飞利浦公司的 Heart Model。eSie LVA 软件仅提供左心室的单室分析,研究证明 eSie LVA 使用多个连续心动周期的 3D 数据集进行自动分析,准确度与单次心跳 2DE 测量结果相似^[10]。Heart Model 可提供 4 个心腔的分析,但临床上主要应用于 LV 及 LA 的量化。国外学者已对不同类别的自动定量软件进行了准确性和重复性测试,结果证实全自动定量技术能够准确识别左心腔,所得 LA、LV 容积与功能参数均与 MRI 具有很高的相关性,且优于手动 3DE,自动测量的 3D-LVEF 一致性范围在 0.75~0.98^[19-20]。自动定量所得 LV、LA 容积高于传统手动追踪心内膜结果,但与 CMR 结果相比有所低估,其中对收缩末容积(ESV)的低估更大,LVEF 则无明显统计学差异^[21]。目前,飞利浦的 Heart Model 智能解剖模型是国内临床上最常用的三维自定量软件,该软件利用自适应分析算法自动识别

舒张末期和收缩末期,生成初步的心内膜表面,然后与现有的三维数据库进行比较,匹配出适合患者的心脏模型并计算相应容积与功能。与手动 3DE 方法相比,Heart Model 可减少 75% 以上的分析时间^[22-23],单个腔室容积和射血分数的分析通常在 30 s 以内便可完成。

值得注意的是,自适应算法是通过自动检测血液-组织界面和致密心肌界面从而追踪真实的心内膜边界,一般供应商默认心内膜边界设定值为 50%,用户可自定义默认值(即整体修正心内膜边界),另外还可以移动心内膜边界线位置进行局部调整。这或许可部分解释自动心内膜追踪较手动追踪测量重复性更高,因为手动追踪法一开始没有边界值的设置,需要人工选择正确的舒张末期和收缩末期,再根据经验人工描绘心内膜边界。另外,不同的心内膜边界默认值可能是自动定量算法研究结果之间变异性的来源。研究证明,在部分患者中进行人工边界修正能提高 LV、LA 容积测量的再现性和准确性^[21,24-25],但在三维经验不足的医师中边界修正并未明显提高测量的准确性,这说明临床使用自动三维超声分析软件时需要对操作者进行相关培训^[26]。对于 LVEF 而言,边界修正对结果无明显影响^[21],这意味着使用自动分析的 3D-LVEF 重复性高,可使临床解读结果更加统一。

自动定量分析另一优点是适用于心律失常的患者,如心房颤动(AF)患者。由于逐次心跳变异性 AF 患者心腔大小与功能的评估一直是心脏超声检查的难点。既往研究通常采集多次(5~13 个连续心动周期)测量取平均值,操作步骤繁琐、耗时。指南推荐测量 AF 患者 LVEF 时应采集 5 个心动周期以上的图像^[16],但传统 3DE 容积率高,多次心跳采集容易造成拼接伪像,无法实现 AF 患者的逐次心跳分析。自动定量技术提供的单心动周期模式可以实现更准确、简单的 3D-LVEF 量化。OTANI 等^[27]研究证实,使用单心动周期 3DE 全容积数据集结合全自动定量软件测量多次心跳心腔大小与功能指标是可行的,单拍自动测量的 3D-LVEF 与手动多次测量取平均值的结果高度相关,但单拍自动测量的分析时间较多拍约减少 22 min。该研究证明单拍模式的三维自动定量技术有望临床应用于 AF 患者心脏机械力学指标的评估。

最近,Heart Model 将自适应算法与三维斑点追踪(STE)结合,可以提供左心腔的逐帧分析,快速得出 LV 及 LA 时间-容积曲线,从射血、排空、充盈等多参数动态地分析心腔变化(此处称为 Dynamic Heart Model),提供更多的临床信息。NARANG 等^[28]使用

Dynamic Heart Model 与传统三维分析软件(4D LV analysis and LA function,德国 TomTec 公司)及 CMR 进行 LV、LA 的动态曲线对比分析,其中自动三维分析时间为(35±17)s,手动三维分析为(3.6±0.9)min,CMR 为(96±14)min;3 种方法所得的时间容积曲线的形态变化相似,Dynamic Heart Model 的射血及充盈参数测值无明显观察者间变异性。此外,Dynamic Heart Model 还可以额外对 LV 质量进行自动评估,结果较传统三维分析软件与 CMR 偏倚更小[(5±37)g vs. (7±27)g],且测值重复性高[ICC=0.99;CoV=(4±5)%]^[29]。相信随着算法的不断升级,自动定量技术在未来可分析更多的心脏功能参数。

3.3 左心自动量化的挑战

尽管 AI 使左心容积与功能的快速定量成为现实,但依旧面临如下挑战:首先,不管是何种软件的自动定量技术依旧受到图像质量的影响。在图像质量欠佳的患者中,边界调整就有存在的必要。虽然调整后自动分析的准确性有所提高,与 MRI 相关性更强,但是这也意味着并未完全实现全自动化定量分析。这需要算法的开发和探头的升级来进一步提高三维图像的时间及空间分辨率,增加识别的精确度。虽然使用这种分析方法获得的测量精度仍然依赖于图像质量,但其程度明显小于使用当前半自动软件。其次,现有的自动量化算法对部分类型患者无法进行准确识别,如节段性室壁运动异常、左心室形态扭曲、心尖肥厚型心肌病等患者。这需要进一步扩展“知识库”的病例类型,将更多的病种纳入其中。然而在建立知识库时,往往需要高质量的原始数据集,这就需要具有丰富经验的专家进行数据采集。此外,对于不同类型的心腔可能需要设置不同的心内膜边界默认值^[25],未来需要进一步针对各类心脏疾病进行具体化研究。与此同时,目前三维容积与射血分数的正常值或许并不适用于自动定量测值,这需要针对不同年龄、性别及种族的大量研究。最后,超声声学造影在量化心腔容积的地位已经得到公认,未来需要增加自动测量与超声造影的对比研究,以增加其说服力。

4 小 结

AI 在心腔自动定量的前景值得肯定,自动定量技术不但提高超声医师的工作效率,还能促进临床、超声解读结果的统一,进一步促进智能化医疗模式建立。随着自动定量技术算法的不断改进,在提高测量准确性和重复性的同时,相信还可以实现多腔室同步定量分析,使三维超声更快普适于临床应用。

参考文献

- [1] SHAMEER K, JOHNSON K W, GLICKSBERG B S, et al. Machine learning in cardiovascular medicine: are we there yet? [J]. *Heart*, 2018, 104(14): 1156-1164.
- [2] ESTEVA A, KUPREL B, NOVOA R A, et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks [J]. *Nature*, 2017, 542(7639): 115-118.
- [3] LEE J G, JUN S, CHO Y W, et al. Deep learning in medical imaging: general overview [J]. *Korean J Radiol*, 2017, 18(4): 570-584.
- [4] KHAMIS H, ZURAKHOV G, AZAR V, et al. Automatic apical view classification of echocardiograms using a discriminative learning dictionary [J]. *Med Image Anal*, 2017, 36: 15-21.
- [5] KUSUNOSE K, ABE T, HAGA A, et al. A deep learning approach for assessment of regional wall motion abnormality from echocardiographic images [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(2 Pt 1): 374-381.
- [6] SENGUPTA P P, HUANG Y M, BANSAL M, et al. Cognitive machine-learning algorithm for cardiac imaging: a pilot study for differentiating constrictive pericarditis from restrictive cardiomyopathy [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(6): e004330.
- [7] ZHANG J, GAJJALA S, AGRAWAL P, et al. Fully automated echocardiogram interpretation in clinical practice [J]. *Circulation*, 2018, 138(16): 1623-1635.
- [8] THAVENDIRANATHAN P, LIU S, VERHART D, et al. Feasibility, accuracy, and reproducibility of real-time full-volume 3D transthoracic echocardiography to measure LV volumes and systolic function: a fully automated endocardial contouring algorithm in sinus rhythm and atrial fibrillation [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(3): 239-251.
- [9] FREDERIKSEN C A, JUHL-OLSEN P, HERMANSEN J F, et al. Clinical utility of semi-automated estimation of ejection fraction at the point-of-care [J]. *Heart Lung Vessel*, 2015, 7(3): 208-216.
- [10] HOVNANIANS N, WIN T, MAKKIYA M, et al. Validity of automated measurement of left ventricular ejection fraction and volume using the Philips EPIQ system [J]. *Echocardiography*, 2017, 34(11): 1575-1583.
- [11] ABAZID R M, ABOHAMR S I, SMETTEI O A, et al. Visual versus fully automated assessment of left ventricular ejection fraction [J]. *Avicenna J Med*, 2018, 8(2): 41-45.
- [12] MARET E, BRUDIN L, LINDSTROM L, et al. Computer-assisted determination of left ventricular endocardial borders reduces variability in the echocardiographic assessment of ejection fraction [J]. *Cardiovasc Ultrasound*, 2008, 6: 55.
- [13] AURICH M, ANDRÉ F, KELLER M, et al. Assessment of left ventricular volumes with echocardiography and cardiac magnetic resonance imaging: real-life evaluation of standard versus new semiautomatic methods [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27(10): 1017-1024.
- [14] KNACKSTEDT C, BEKKERS S C, SCHUMMERS G, et al. Fully automated versus standard tracking of left ventricular ejection fraction and longitudinal strain: the FAST-EFs multicenter study [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 66(13): 1456-1466.
- [15] THAVENDIRANATHAN P, GRANT A D, NEGISHI T, et al. Reproducibility of echocardiographic techniques for sequential assessment of left ventricular ejection fraction and volumes: application to patients undergoing cancer chemotherapy [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 61(1): 77-84.
- [16] LANG R M, BADANO L P, MOR-AVI V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(3): 233-270.
- [17] TSANG W, SALGO I S, MEDVEDOFKY D,

- et al. Transthoracic 3D echocardiographic left heart chamber quantification using an automated adaptive analytics algorithm[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(7):769-782.
- [18] CHOI J, HONG G R, KIM M, et al. Automatic quantification of aortic regurgitation using 3D full volume color doppler echocardiography: a validation study with cardiac magnetic resonance imaging [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2015, 31(7):1379-1389.
- [19] LEVY F, DAN SCHOUVER E, IACUZIO L, et al. Performance of new automated transthoracic three-dimensional echocardiographic software for left ventricular volumes and function assessment in routine clinical practice: Comparison with 3 Tesla cardiac magnetic resonance [J]. *Arch Cardiovasc Dis*, 2017, 110(11):580-589.
- [20] BERNARD O, BOSCH J G, HEYDE B, et al. Standardized evaluation system for left ventricular segmentation algorithms in 3D echocardiography[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2016, 35(4):967-977.
- [21] MEDVEDOFSKY D, MOR-AVI V, AMZULESCU M, et al. Three-dimensional echocardiographic quantification of the left-heart chambers using an automated adaptive analytics algorithm: multicentre validation study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(1):47-58.
- [22] MURARU D, CECCHETTO A, CUCCHINI U, et al. Intervendor consistency and accuracy of left ventricular volume measurements using threedimensional echocardiography [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2018, 31(2):158-168.
- [23] SPITZER E, REN B, SOLIMAN O I, et al. Accuracy of an automated transthoracic echocardiographic tool for 3D assessment of left heart chamber volumes [J]. *Echocardiography*, 2017, 34(2):199-209.
- [24] MEDVEDOFSKY D, KEBED K, LAFFIN L, et al. Reproducibility and experience dependence of echocardiographic indices of left ventricular function: side-by-side comparison of global longitudinal strain and ejection fraction [J]. *Echocardiography*, 2017, 34(3):365-370.
- [25] SUN L, FENG H, NI L, et al. Realization of fully automated quantification of left ventricular volumes and systolic function using transthoracic 3D echocardiography [J]. *Cardiovasc Ultrasound*, 2018, 16(1):2.
- [26] MEDVEDOFSKY D, MOR-AVI V, BYKU I, et al. Three-dimensional echocardiographic automated quantification of left heart chamber volumes using an adaptive analytics algorithm: feasibility and impact of image quality in non-selected patients [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2017, 30(9):879-885.
- [27] OTANI K, NAKAZONO A, SALGO I S, et al. Three-dimensional echocardiographic assessment of left heart chamber size and function with fully automated quantification software in patients with atrial fibrillation [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2016, 29(10):955-965.
- [28] NARANG A, MOR-AVI V, PRADO A, et al. Machine learning based automated dynamic quantification of left heart chamber volumes [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(5):541-549.
- [29] VOLPATO V, MOR-AVI V, NARANG A, et al. Automated, machine learning-based, 3D echocardiographic quantification of left ventricular mass [J]. *Echocardiography*, 2019, 36(2):312-319.

(收稿日期:2020-11-12 修回日期:2021-03-08)