

论 著

MRI人工智能辅助压缩感知心脏电影序列在心脏功能评估中的应用价值*

范伟雄¹ 张添辉¹ 钟 炜²
钟鑫威¹ 张文巨¹ 张昭男¹
程亚宝¹ 钟志雄^{2,*}

1.梅州市人民医院磁共振科

2.梅州市人民医院心内科 (广东 梅州 514031)

【摘要】目的 探讨MRI人工智能辅助压缩感知(ACS)心脏电影(cine)序列在心脏功能评估中的应用价值。**方法** 本研究连续纳入2022年5月至12月在我院行心脏MRI检查的63例受检者。所有受检者均进行常规cine和ACS-cine两种序列扫描,采用5分法进行图像质量评价。应用Wilcoxon符号秩检验对2种心脏cine序列的扫描时间、图像质量评分及心室功能定量参数进行比较。采用Spearman相关分析和Bland-Altman分析评价两种序列测量心室功能定量参数的相关性和一致性。**结果** 常规cine与ACS-cine序列扫描时间差异具有统计学意义($Z=-6.904$, $P<0.001$),后者可将扫描时间大幅缩短约92.82%。常规cine与ACS-cine序列图像质量评分差异无统计学意义($Z=-0.816$, $P>0.05$)。在心脏功能定量参数评估方面,常规cine与ACS-cine序列之间的LVEF、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV参数差异无统计学意义($P>0.05$),但LVEDV参数存在统计学差异($Z=-2.958$, $P<0.05$)。常规cine与ACS-cine序列之间的心脏功能定量参数(LVEF、LVEDV、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV)均有良好的相关性($r=0.865\sim 0.963$, $P<0.01$)。Bland-Altman分析显示,常规cine与ACS-cine序列图像获取的左心室及右心室功能定量参数(LVEF、LVEDV、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV)平均差异均接近于零,且变异范围很小,一致性高。**结论** 相较于常规cine序列,ACS-cine序列能显著缩短成像时间的同时保证图像质量,并可准确分析左心室及右心室功能定量参数,具有较高的临床应用价值。

【关键词】 磁共振成像; 人工智能; 压缩感知;
心脏电影成像; 心功能分析

【中图分类号】R445.2; R542.2

【文献标识码】A

【基金项目】国家高性能医疗器械创新中心

开放基金项目(NMED2021MS-01-002)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.09.026

The Value of MRI Artificial Intelligence-assisted Compression-aware Cardiac Cine Sequences in Cardiac Function Assessment*

FAN Wei-xiong¹, ZHANG Tian-hui¹, ZHONG Wei², ZHONG Xin-wei¹, ZHANG Wen-ju¹,
ZHANG Zhao-nan¹, CHENG Ya-bao¹, ZHONG Zhi-xiong^{2,*}.

1.Department of MRI, Meizhou People's Hospital, Meizhou 514031, Guangdong Province, China

2.Department of Cardiology, Meizhou People's Hospital, Meizhou 514031, Guangdong Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the value of MRI artificial intelligence-assisted compressed sensing (ACS) cardiac cine (cine) sequence in cardiac function assessment. **Methods** Sixty-three subjects who underwent cardiac MRI in our hospital from May to December 2022 were consecutively included in this study. All subjects were scanned with both conventional cine and ACS-cine sequences, and image quality was evaluated using a 5-point scale. The Wilcoxon signed rank test was applied to compare the scan time, image quality scores and ventricular function results of the 2 cardiac cine sequences. Spearman correlation analysis and Bland-Altman analysis were used to evaluate the correlation and consistency of the two sequences for measuring cardiac function. **Results** The difference in scan time between the conventional cine and ACS-cine sequences was statistically significant ($Z=-6.904$, $P<0.001$), with the latter significantly reducing scan time by approximately 92.82%. The difference in image quality scores between conventional cine and ACS-cine sequences was not statistically significant ($Z=-0.816$, $P>0.05$). There was no statistically significant difference in LVEF, LVESV, RVEF, RVEDV, and RVESV parameters between conventional cine and ACS-cine sequences (all $P>0.05$), but there was a statistically significant difference in the LVEDV parameter ($Z=-2.958$, $P<0.05$). Quantitative cardiac function parameters (LVEF, LVEDV, LVESV, RVEF, RVEDV, RVESV) were all well correlated between conventional cine and ACS-cine sequences ($r=0.865\sim 0.963$, all $P<0.01$). Bland-Altman analysis showed that the mean differences in quantitative parameters of LV and RV function (LVEF, LVEDV, LVESV, RVEF, RVEDV, RVESV) obtained from conventional cine and ACS-cine sequence images were all close to zero with a small range of variation and high agreement. **Conclusion** Compared with conventional cine, ACS-cine can significantly shorten the imaging time while guaranteeing the image quality, and can accurately analyze the LV and RV functions, which has high clinical application value.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging; Artificial Intelligence; Compressed Sensing; Cardiac Cine Imaging; Cardiac Function Analysis

电影成像(cine)是心脏磁共振成像(cardiovascular magnetic resonance, CMR)中不可或缺的序列,不仅可直观显示心脏形态学改变,还能通过后处理获得心功能等定量指标^[1]。然而,常规cine序列扫描时间长,需患者多次重复屏气以保持一致的心脏位置,图像质量易受到心脏跳动及呼吸运动影响^[2]。因此,临床上亟需一种能够快速、高效扫描,且图像质量高的心脏cine成像方法。人工智能辅助压缩感知(artificial intelligence compressed sensing, ACS)是一种通过将深度学习神经网络有效融入至压缩感知框架的MRI超高加速成像技术,能够显著缩短扫描时间和提升图像质量^[3]。目前,ACS在颅脑^[4]、鼻咽^[5]、骨关节^[6-7]等静态解剖结构MRI加速采集方面展现出良好的应用前景,但在心脏等动态器官的研究尚少。本研究将ACS这一新技术应用于心脏cine扫描,探讨其在改善心脏MRI检查时间和图像质量等方面的价值,旨在为心脏cine快速成像提供新的方案。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究连续纳入2022年5月至12月在我院行心脏MRI检查的患者,所有患者检查前签署知情同意书。

受检者纳入标准:年龄 ≥ 18 岁;无MRI检查禁忌证。排除标准:幽闭恐惧症患者;身体状况不佳,无法配合完成MRI检查者;曾行心脏支架或心脏瓣膜植入手术者。最终共纳入63例受检者,男性44名,女19名,年龄18~79岁,平均(53.70 ± 15.07)岁。

1.2 检查设备及方法 所有受检者均在uMR 780 3.0T磁共振检查仪(上海联影医疗科技股份有限公司)进行扫描,采用12 $\times$ 2通道的磁体线圈。所有受检者均接受常规cine和ACS-cine序列扫描,扫描范围为左心室心底至心尖连续9层短轴层面。具体扫描参数详见表1。

1.3 图像质量评价 由两名具有丰富CMR诊断经验的医师(一名主任医师和一名主治医师)在对成像参数不知情的情况下采用5分法进行图像质量评价,评价标准见表2。

1.4 心脏功能分析 将CMR数据导入联影后处理工作站(uWS-890)心功能分析软件,由软件自动检测心内膜和心外膜轮廓,然后由两位主治医师共同对轮廓进行手动校正,计算获得常规cine与ACS-cine两个序列的左心室(left ventricular, LV)和右心室(right

【第一作者】范伟雄,男,主任医师,主要研究方向:心脏磁共振诊断及研究。Email: fanweixiong@mzrmmy.com

【通讯作者】钟志雄,男,主任医师,主要研究方向:心脏磁共振诊断及研究。Email: zhongzhixiong@mzrmmy.com

ventricular, RV)功能学参数,包括舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)、收缩期末期容积(end-systolic volume, ESV)和射血分数(ejection fraction, EF)。EF的计算公式为 $EF=(EDV-ESV)/EDV\times 100\%$ 。

1.5 统计学方法 采用SPSS 20.0和MedCalc15.6.1软件进行统计学分析。计量资料采用均数±标准差或中位数(上、下四分位数)表示。采用Kappa检验评估图像质量主观评分的观察者间一致性(Kappa值0~0.20为极低;0.21~0.40为一般;0.41~0.60为中

等;0.71~0.80为良好;0.81~1.00为高)。若一致性超过中等,选择主任医师的图像质量主观评分结果进一步分析。应用Wilcoxon符号秩检验对2种心脏cine序列的扫描时间、图像质量评分及心室功能结果进行比较。采用Spearman相关分析评估两种序列所获得心功能定量参数的相关性。采用Bland-Altman分析评估两种序列所获得心功能定量参数的一致性。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

表1 常规cine与ACS-cine序列扫描参数

序列	TR (ms)	TE (ms)	FOV (mm)	矩阵	层数	层厚(mm)	层间距(mm)	翻转角(°)	带宽 (Hz/pixel)	屏气次数
常规cine	2.76	1.28	360×320	224×224	9	8	3.2	60	1200	9
Acs-cine	2.9	1.37	360×320	224×224	9	8	3.2	50	1500	1

表2 图像质量5分法主观评价标准

分数	图像质量	具体表现
5	优	心 肌内外膜轮廓清晰,无伪影
4	较好	心 肌内外膜轮廓较清晰,仅存在少许伪影
3	中等	心 肌内外膜轮廓轻度模糊,存在轻度伪影,基本达到诊断要求
2	欠佳	心 肌内外膜轮廓较模糊,存在中度伪影,难以达到诊断要求
1	差	心 肌内外膜轮廓难以识别,存在大量伪影,无法诊断

2 结 果

2.1 两种序列采集时间比较 常规cine序列扫描时间为 $(210.43\pm 6.53)s$,ACS-cine序列扫描时间为 $(15.10\pm 1.20)s$,后者可将扫描时间大幅缩短约92.82%,两种序列的扫描时间差异具有统计学意义($Z=-6.904, P<0.001$)。

2.2 图像质量主观评价 两位医师对常规cine与ACS-cine两种

序列的图像质量评分均 ≥ 3 分,均满足诊断要求(图1)。两位医师对图像质量评分一致性良好及高(常规cine序列Kappa值为0.893,ACS-cine序列Kappa值为0.745, P 均 <0.05)。常规cine图像质量评分为 (4.29 ± 0.68) 分,稍高于ACS-cine图像质量评分 (4.25 ± 0.62) 分,但差异无统计学意义($Z=-0.816, P>0.05$)。

2.3 心功能分析结果 在心功能定量参数评估方面,常规cine与ACS-cine序列之间的LVEF、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV参数差异无统计学意义(P 均 >0.05),但LVEDV参数存在统计学差异($Z=-2.958, P<0.05$)(表2)。根据Spearman相关分析结果显示,常规cine与ACS-cine序列之间的心室功能定量参数(LVEF、LVEDV、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV)均有良好的相关性($r=0.865\sim 0.963, P$ 均 <0.01)。Bland-Altman分析显示,常规cine与ACS-cine序列图像获取的心室功能定量参数(LVEF、LVEDV、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV)平均差异均接近零,且变异范围很小,一致性高(图2)。

表3 比较2种序列采集图像的左心室与右心室心功能定量参数[中位数(上、下四分位数)]

	左心室功能			右心室功能		
	LVEF (%)	LVEDV (mL)	LVESV (mL)	RVEF (%)	RVEDV (mL)	RVESV (mL)
常规cine	52.82(31.07,67.03)	136.2(114.59,201.22)	59.06(36.7,129.6)	55.69(44.37,62.81)	119.12(96.89,146.79)	52.53(37.94,80.89)
ACS-cine	51.79(29.53,66.04)	132.2(107.7,185.55)	61.15(36.7,126.58)	54(46.4,61.27)	122.87(94.22,145.92)	57.55(38.08,77.48)
Z值	-1.527	-2.958	-0.661	-0.863	-0.568	-1.530
P值	0.127	0.003	0.509	0.388	0.57	0.126

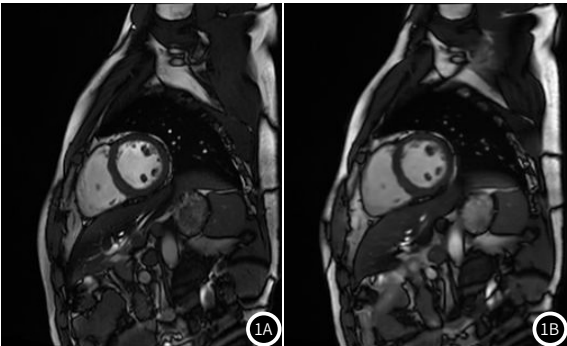
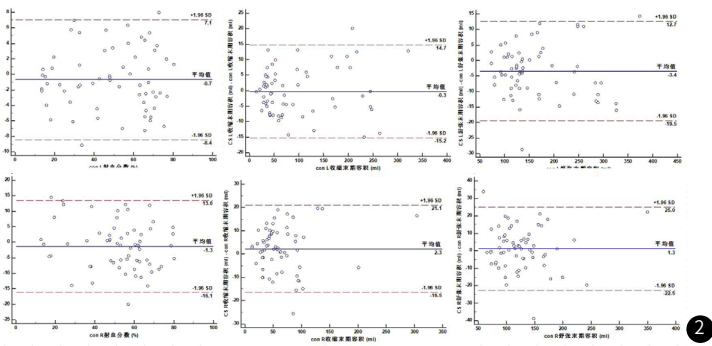


图1A 常规cine序列,图像质量评分5分,扫描时间为213s。图1B ACS-cine序列,图像质量评分5分,扫描时间为15s。

图2 常规cine与ACS-cine序列的LVEF、LVEDV、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV结果的一致性分析Bland-Altman图。



3 讨 论

CMR是评价心脏疾病及心功能的重要检查方法,在临床上广泛应用^[8-9]。心脏cine序列能够精确显示收缩期与舒张期的心室形态,并通过后处理计算出各种心功能参数,已成为CMR检查中的重要序列。然而,由于心脏在持续运动中“抓拍”图像极其困难,常规cine序列扫描时间较长,需患者多次屏气配合进行检查,图像质量极易受到心脏跳动及呼吸运动等影响^[10-11]。因此,如何实现CMR高时空分辨率成像,以降低甚至消除图像采集过程

中的运动干扰是CMR快速成像的重要研究课题。近年随着人工智能技术的发展,ACS技术创新性地将深度学习神经网络引入到图像重建过程中,以抑制在高加速因子下形成的各种伪影,实现在不牺牲图像质量的同时显著缩短扫描时间^[12-13]。

本研究结果显示,常规cine序列扫描时间为 $(210.43\pm 6.53)s$,而ACS-cine序列扫描时间为 $(15.10\pm 1.20)s$,后者可将图像采集时间大幅缩短约92.82%,使得患者仅需单次屏气即可完成全心

的短轴cine序列扫描,极大提高了CMR成像的普适性。该结果与Li等^[14]研究类似,其将ACS序列应用肝脏T₂WI成像,结果显示与常规T₂WI序列相比,ACS序列在图像质量及病灶检出方面效果相当的情况下,成像采集时间由4~6min缩短至17s。Yan等^[15]亦发现利用深度神经网络能够实现对心脏cine的高加速成像,其研究结果显示常规cine序列扫描时间为(84±13)s,ACS-cine序列扫描时间为(15±2)s。本研究还发现,ACS-cine与常规cine序列图像质量评分的差异无统计学意义($P>0.05$),且两种序列的图像质量评分均 ≥ 3 分,能够满足诊断要求。上述结果表明ACS通过深度神经网络能够实现对心脏高加速成像的同时保证图像质量,突破了心脏因运动难以快速、清晰成像的难题。

本研究结果还发现,常规cine与ACS-cine序列之间的心室功能定量参数(LVEF、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV)差异均无统计学意义($P>0.05$),但常规cine序列的RVEDV稍大于ACS-cine序列,且差异有统计学差异($P<0.05$)。该结果与Yan等^[14]的研究结果一致,其研究分析了70例患者常规cine和ACS-cine序列的左右心室功能参数,结果显示LVEF、LVESV、RVEF、RVEDV、RVESV等定量参数在两序列之间均不具有统计学差异,而RVEDV差异具有统计学意义($P<0.001$)。分析原因可能为:ACS是基于压缩感知联合智能化迭代算法重建图像的新技术,但仍为压缩感知技术采集图像,当设置较高加速倍数时,信噪比及空间分辨率仍可能在一定程度下降,可能导致心内膜轮廓的高估^[16-17]。

进一步研究结果发现,常规cine与ACS-cine序列之间的心室定量功能参数(LVEF、RVEDV、LVESV、RVEF、RVESV)均有良好的相关性($r=0.865\sim 0.963$, P 均 <0.01),并且Bland-Altman分析示常规cine与ACS-cine序列所获得的心功能定量参数具有良好的一致性,这与既往研究报道相符^[15,18],表明ACS-cine测定心室功能定量参数的价值与常规cine相当,有潜力替代常规cine序列应用于临床。

本研究存在一些不足:首先,本研究为单中心研究,样本量相对较小,有待多中心、大样本的研究对结果进一步验证。其次,本研究仅对短轴cine序列图像质量及其测量获得的心功能指标进行了分析,对于其他序列没有相关分析,还有待进一步研究。第三,心室应变参数逐渐应用于临床,其能在心功能未改变之前发现心肌异常改变,但在本研究中并未涉及。

综上所述,相较于常规cine序列,ACS-cine序列能显著缩短成像时间的同时保证图像质量,并可准确分析左心室及右心室功能定量参数,有潜力替代常规cine序列应用于临床。

参考文献

- [1] Leiner T, Bogaert J, Friedrich M G, et al. SCMR position paper (2020) on clinical indications for cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1): 76.
- [2] Hong S, Hong K, Culver A E, et al. Highly accelerated real-time free-breathing cine CMR for patients with a cardiac implantable electronic device[J]. Academic Radiology, 2021, 28(12): 1779-1786.
- [3] 胡成林, 柳秋风, 李华玲, 等. 人工智能辅助下的压缩感知技术在肝脏T₂WI中的应用价值[J]. 放射学实践, 2023, 38(4): 508-513.
- [4] 刘锴, 孙海涛, 王剑, 等. 人工智能压缩感知结合单激发技术在颅脑MR T₂液体衰减反转恢复成像中的应用[J]. 实用放射学杂志, 2023, 39(5): 821-824.

- [5] Liu H, Deng D, Zeng W, et al. AI-assisted compressed sensing and parallel imaging sequences for MRI of patients with nasopharyngeal carcinoma: comparison of their capabilities in terms of examination time and image quality[J]. Eur Radiol, 2023, 33(11): 7686-7696.
- [6] Wang Q, Zhao W, Xing X, et al. Feasibility of AI-assisted compressed sensing protocols in knee MR imaging: a prospective multi-reader study[J]. Eur Radiol, 2023, 33(12): 8585-8596.
- [7] Liu J, Li W, Li Z, et al. Magnetic resonance shoulder imaging using deep learning-based algorithm[J]. Eur Radiol, 2023, 33(7): 4864-4874.
- [8] 程凤燕, 张文巨, 张添辉, 等. 多参数心脏MR对心尖肥厚型心肌病诊断及分型价值研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20(8): 85-87.
- [9] 郭小会, 冷琦. 心脏磁共振IVIM成像定量评估肥厚型心肌病患者左心室壁肥厚程度的价值及临床意义[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(9): 42-45.
- [10] Curione D, Ciliberti P, Monti C B, et al. Compressed sensing cardiac cine imaging compared with standard balanced steady-state free precession cine imaging in a pediatric population[J]. Radiol Cardiothorac Imaging, 2022, 4(2): e210109.
- [11] Wang J, Li X, Lin L, et al. Diagnostic efficacy of 2-shot compressed sensing cine sequence cardiovascular magnetic resonance imaging for left ventricular function[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2020, 10(3): 431-441.
- [12] Chandra S S, Bran L M, Liu X, et al. Deep learning in magnetic resonance image reconstruction[J]. J Med Imaging Radiat Oncol, 2021, 65(5): 564-577.
- [13] Lin D J, Johnson P M, Knoll F, et al. Artificial intelligence for MR image reconstruction: an overview for clinicians[J]. J Magn Reson Imaging, 2021, 53(4): 1015-1028.
- [14] Li H, Hu C, Yang Y, et al. Single-breath-hold T₂WI MRI with artificial intelligence-assisted technique in liver imaging: as compared with conventional respiratory-triggered T₂WI[J]. Magn Reson Imaging, 2022, 93: 175-180.
- [15] Yan X, Luo Y, Chen X, et al. From compressed-sensing to deep learning MR: comparative biventricular cardiac function analysis in a patient cohort[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2024, 59(4): 1231-1241.
- [16] Kido T, Kido T, Nakamura M, et al. Compressed sensing real-time cine cardiovascular magnetic resonance: accurate assessment of left ventricular function in a single-breath-hold[J]. Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance, 2016, 18(1): 50.
- [17] 杨新颖, 钟佳利, 彭如臣, 等. 磁共振压缩感知心脏电影成像相较于常规心脏电影成像在急性心肌梗死术后心功能评价的对比研究[J]. 磁共振成像, 2021, 12(3): 49-53.
- [18] 冉玲平, 黄璐, 严祥虎, 等. 心脏磁共振自由呼吸运动校正人工智能电影序列在心力衰竭患者中的临床应用[J]. 磁共振成像, 2024, 15(3): 62-67.

(收稿日期: 2024-04-08)

(校对编辑: 江丽华)