论　著

压缩感知加速因子对吞咽磁共振电影成像的影响*

刘一帆[1]　郭效宾[1]　杨晓娟[2]
徐　敏[1]　柯腾飞[1,*]
1.昆明医科大学第三附属医院/云南省肿瘤医院放射科
2.昆明医科大学第三附属医院/云南省肿瘤医院头颈外一科 (云南 昆明 650118)

【摘要】**目的** 探讨不同压缩感知(CS)加速因子对吞咽磁共振电影成像(Cine-MRI)图像质量的影响和临床应用可行性。**方法** 前瞻性招募吞咽功能无异常且可进行磁共振检查的52名健康志愿者进行吞咽Cine-MRI。采用加速因子分别为3倍、5倍、8倍、10倍的Cine-MRI序列对每位志愿者进行扫描。对比四种加速因子下图像质量的主观评分及信号强度、标准差、图像信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)等定量结果。**结果** 除CS3组外，其余三组均获得吞咽口咽期图像。两位医师对不同压缩感知加速因子图像的主观评分之间一致性良好，而随着压缩感知加速因子的增大，图像质量主观评分不断下降。CS5与CS8、CS10间存在显著差异(*P*均＜0.01)。各组图像中水与舌肌处信号标准差的差异无统计学意义 (*P*＞0.05)。CS5、CS8的SNR没有明显差异(*P*＞0.05)，但显著高于CS10 (*P*均＜0.05); CS5的CNR高于CS8、CS10(*P*均＜0.05)。**结论** 5倍压缩感知加速因子条件下获得的图像时间分辨率及图像质量俱佳，是进行吞咽磁共振电影成像的最优选择。

【关键词】磁共振成像；压缩感知；磁共振电影成像；吞咽
【中图分类号】R445.2
【文献标识码】A
【基金项目】云南省科技厅-昆明医科大学应用基础研究联合专项面上项目(202101AY070001-183)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.04.013

Effect of Compressed Sensing Acceleration Factor on Swallowing Cine MRI*

LIU Yi-fan[1], GUO Xiao-bin[1], YANG Xiao-juan[2], XU Min[1], KE Teng-fe[1,*].
1.Department of Radiology, The Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Yunnan Cancer Hospital, Kunming 650118, Yunnan Province, China
2.The First Department of Head and Neck Surgery, The Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Yunnan Cancer Hospital, Kunming 650118, Yunnan Province, China

ABSTRACT
Objective To investigate the impact of different compressed sensing (CS) acceleration factors on the image quality of Cine-MRI for swallowing and evaluate its clinical feasibility. ***Methods*** A total of 52 healthy volunteers with normal swallowing function underwent Cine-MRI scans using acceleration factors of 3, 5, 8, and 10. The subjective image quality scores and quantitative parameters including signal intensity, standard deviation, image signal-to-noise ratio (SNR), and contrast-to-noise ratio (CNR) were compared across the four acceleration factors. ***Results*** Images capturing the oropharyngeal phase of swallowing were successfully obtained in all groups except CS3. There was a high level of agreement between two radiologists' subjective scores for images acquired at different compressive sensing acceleration factors. As the compression factor increased, there was a continuous decrease in subjective image quality scores. Significant differences were observed among CS5, CS8, and CS10 (all *P*<0.01). No significant difference was found in signal standard deviation between water and tongue muscle within each group (*P*>0.05), but significant differences were observed in SNR and CNR (both *P*<0.01). There was no significant difference in SNR between CS5 and CS8 (*P*>0.05), while both had significantly higher SNR than that of CS10 (*P*<0.05). Additionally, CNR for CS5 was higher than that for both CS8 and CS10(all *P*<0.05). ***Conclusion*** Based on our findings, an accelerated imaging protocol with a five-fold compressed sensing acceleration factor provides optimal trade-off between temporal resolution and image quality for cine magnetic resonance imaging during swallowing."
Keywords: Magnetic Resonance Imaging; Compressed Sensing; Cine Magnetic Resonance Imaging; Swallowing

近年来，磁共振电影成像(cine magnetic resonance imaging, Cine-MRI)作为一种新兴的无辐射影像检查方法逐渐被尝试用于替代传统的X线透视检查，以记录吞咽过程、分析肌肉运动、评价研究吞咽功能[1-2]。然而，受到图像重建限制，常规CINE-MRI序列无法在保证图像质量的前提下实现较高的时间分辨率，很难对吞咽这一速度极快的生理动作进行完整、细致地捕捉[3]。因此，临床上亟需一种能快速成像并保证图像质量的吞咽Cine-MRI方法。

压缩感知(compressed sensing, CS)技术利用信号的稀疏特性突破奈奎斯特采样率条件，从随机采样中获取信号的离散样本，并用非线性迭代算法重建图像，应用于磁共振扫描可大幅减少数据采集量，进而缩短扫描时间，在保证磁共振图像质量的前提下极大提高扫描序列的时间分辨率[4]。目前，CS的优越性与可靠性已在临床实践中得到了良好的验证[5-7]，但在吞咽Cine-MRI方面应用较少。本研究将联合Cine-MRI序列与CS技术，通过测试不同加速因子对Cine-MRI图像质量及成像速度的影响，探索能兼顾时间分辨率和图像质量的最佳因子，以期为CS技术用于吞咽Cine-MRI提供有力的理论依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 招募吞咽功能无异常且可进行磁共振检查的健康志愿者进行试验。经本院伦理委员会批准，志愿者均签署知情同意书。

纳入标准为：吞咽功能正常且以往无影响吞咽功能的疾病；无磁共振检查禁忌症。排除标准为：志愿者在进行磁共振检查时由于配合不佳，出现呛咳或反复吞咽等异常动作，无法用于进一步分析者。最终共纳入52位符合入组条件的健康志愿者，其中男性24位，女性28位，平均年龄为(26.8 ± 6.52)岁。

1.2 检查设备及方法 磁共振检查均在Ingenia Elition 3.0T超导型磁共振扫描仪(荷兰，飞利浦)进行，采用20通道头颈联合相控阵线圈。志愿者仰卧于检查床，用泡沫填充物固定头部，由吸管连接充满温水的100mL注射器，在每个序列扫描开始前将10mL水含在口中，扫描过程中将水咽下。

1.3 扫描参数 设计CS3、CS5、CS8、CS10四组扫描方案。每组方案均进行正中矢状位扫描，扫描范围包括鼻咽部、口腔、口咽部、喉咽部。其余扫描参数保持一致：FOV:300mm×300mm，矩阵152×148，层厚10mm，TR/TE：2.6ms/1.28ms，激励次数1次，扫描层数1层。各组方案成像时间分辨率见表1。

1.4 图像质量主观评分 由两名三年以上头颈影像诊断经验的医生作为观察者，在对参数不知情的情况下，采用5分法(表2)进行独立的图像质量主观评分。评分一致性好时取两位医师评分的均值进行主观评分比较。

【第一作者】刘一帆，男，主管技师，主要研究方向：磁共振检查技术临床应用。E-mail：564168878@qq.com
【通讯作者】柯腾飞，男，主治医师，主要研究方向：头颈部肿瘤影像诊断。E-mail：250169995@qq.com

1.5 图像质量客观评价 由1名三年以上磁共振扫描经验的主管技师，选取吞咽开始时口腔期图像对水及舌肌勾画感兴趣区(region of interest , ROI)面积为10mm^2，测量记录ROI内水和舌肌的信号强度(signal intensity, SI)，并以此ROI内信号强度的标准差(standard deviation, SD)作为图像噪声，所有数据均重复测量三次，以平均值为最终结果。采用以下公式计算图像信噪比(signal to noise ratio, SNR)及对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR并记录：$SNR=SI_{水}/SD_{舌肌}$，$CNR=(SI_{水}-SI_{舌肌})/Sqrt(SD^2_{舌肌}+SD^2_{水})$。

1.6 统计学分析 统计学分析使用SPSS 25.0软件进行，计量资料使用均值±标准差($\bar{x}\pm s$)描述，两名医生主观评分的一致性，采用组内相关系数(intraclass correlation coefficien, ICC)评价，ICC＞0.8认为一致性较好。主观评分、不同CS因子序列间的信号强度、标准差、图像信噪比、对比噪声比等定量结果比较先使用Levene检验其方差齐性并用Shapiro-Wilk检验其分布，符合正态分布及方差齐的数据，将采用单因素方差分析(One Way ANOVA)进行，不符合正态分布及方差不齐数据将采用Kruskal-Wallis检验。以P＜0.05为差异有统计学意义。

表1 不同压缩感知加速因子序列的时间分辨率参数

	动态扫描期数(幅)	扫描所需时间(秒)	时间分辨率(毫秒)	所转化的视频帧率(副/秒)
CS3	50	6.75	135	7.4
CS5	50	4.05	81	12.3
CS8	100	5.1	51	19.6
CS10	100	4	40	25

注：压缩感知(Compressed Sensing, CS)

表2 5分法图像质量主观评分表

评分	评价内容
5分	口咽期显示，吞咽相关组织边界清晰、周围无伪影及噪声，能准确诊断
4分	口咽期显示，吞咽相关组织边界较清晰、周围伪影及噪声较小，可进行诊断
3分	口咽期显示，吞咽相关组织边界不清晰、伪影及噪声较大，难以诊断
2分	口咽期显示，吞咽相关组织无法辨认、伪影及噪声极大，无法诊断
1分	吞咽口咽期未显示(未看到吞咽过程中流动到口咽部的水信号)

2 结 果

2.1 图像质量主观评分 两名头颈影像诊断医生对不同压缩感知加速因子所采集的图像的评分和一致性分析结果见表3。结果显示吞咽Cine-MRI在不同CS加速因子下评分的一致性较好(ICC分别为CS3：0.977、CS5：0.815、CS8：0.879、CS10：0.863)。其中，CS3组有较多图像评为1分，提示未能捕捉到吞咽口咽期,不纳入最终比较。CS5、CS8、CS10组未出现评1分的图像，且评分随CS因子增大而递减，差异有统计学意义(P均＜0.01)，见表4。

2.2 图像质量客观评价 因CS3组出现多个病例捕捉不到吞咽口咽期，提示该序列时间分辨率无法满足吞咽Cine-MRI，未纳入客观指标比较。评分与定量测量数据结果如表4所示，不同压缩感知加速因子图像中SD舌与SD水的差异无统计学意义(P均＞0.05),而SNR、CNR差异显著，具有统计学意义(均P＜0.01。组间比较结果为：CS5组和CS8组的SNR没有明显差异(LSD-t=0.255, P=0.799)，但显著高于CS10组(LSD-t=3.253, P=0.001)；CS5组的CNR高于CS8组(LSD-t=2.120, P=0.036)和CS10组(LSD-t=4.434, P＜0.001)。

表3 2名医师对不同CS因子下吞咽CINE-MRI图像的主观评分及一致性

	医师1	医师2	ICC
CS3	3.10±1.85	3.06±1.82	0.977
CS5	4.25±0.65	4.21±0.64	0.815
CS8	3.38±0.49	3.37±0.49	0.879
CS10	2.46±0.61	2.44±0.57	0.863

表4 不同压缩感知加速因子所得图像的测量数据

	CS5	CS8	CS10	F	P
SD舌肌	12.61 ± 5.39	12.69 ± 6.81	12.94 ± 6.20	0.04	0.962
SD水	105.25±66.12	107.74±77.77	103.26±75.58	0.05	0.953
图像质量评价	4.23±0.61	3.38±0.47*	2.45±0.57&#	134.71	0.000
SNR	212.19±69.80	208.79±66.85	168.89±66.94&#	6.54	0.002
CNR	15.03±8.35	12.52±8.98*	7.69±2.96&#	9.84	0.000

注：*代表CS5与CS8比较有显著差异，&代表CS5与CS10比较有显著差异，#代表CS8与CS10比较有显著差异。

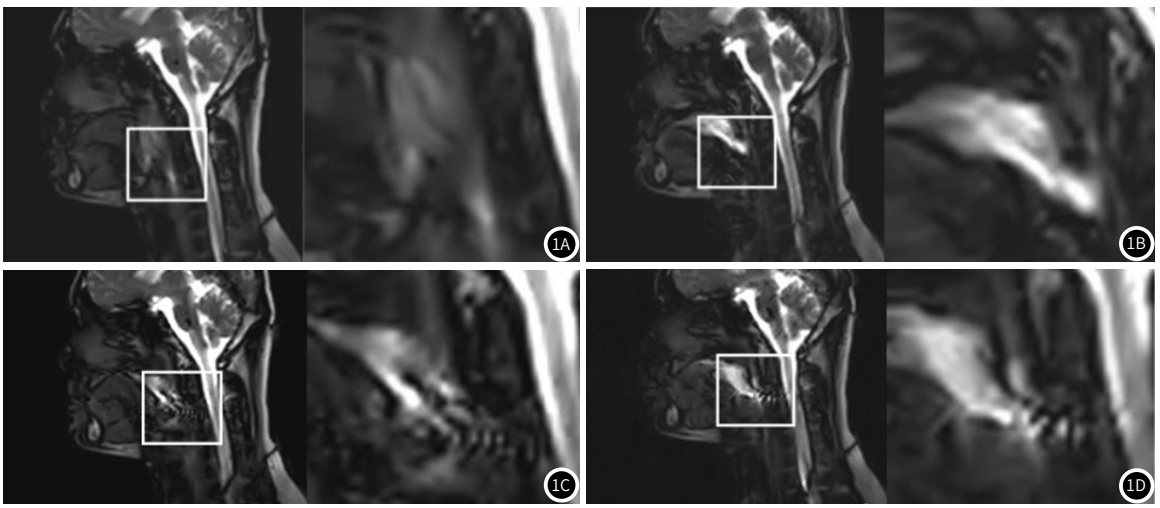


图1 吞咽口咽期不同压缩感知加速因子图像对比图。图1A、1B、1C与1D分别是CS加速因子为3、5、8、10的图像，右侧为左侧白框内截取的放大图像；中口咽部未见到水信号，提示CS3时间分辨率不足，难以显示吞咽口咽期；图1B中可区分流动水与舌肌，且相较于图1C、图1D没有伪影干扰。

3 讨　论

随着磁共振成像技术以及扫描序列的飞速发展，Cine-MRI序列应运而生，目前已被广泛应用于颞下颌关节功能[8]、眼球运动和眼外肌结构[9]、关节活动度[10]、心脏搏动[11]等生理过程的实时成像监测，以电影成像方式对组织器官的运动过程进行动态显示，弥补单纯静态结构成像的不足。吞咽作为人类最为重要的生理活动，是一个连续性发生的运动过程，可分为口腔期、咽期、食管期，各期相互重叠也可依次进行，需要多个器官和结构的共同参与。人类正常的吞咽动作连贯且迅速，利用磁共振检查对吞咽动作进行阶段性评估需配备极高时间分辨率的扫描序列。本研究中，健康志愿者的整个吞咽过程均在1.5秒以内，若时间分辨率过低则难以对整个吞咽过程进行定性诊断或定量测量。既往有研究使用Cine-MRI序列对患者吞咽功能进行检查时，其时间分辨率仅为800 ms[12]，在吞咽过程所获得的磁共振图像较少(约1幅/秒)，因而对临床评价吞咽功能的帮助不大。扫描速度较低仍是运用Cine-MRI序列进行吞咽功能动态成像最大的壁垒。

2006年Candes等[13]提出了压缩感知理论后，利用磁共振设备进行极高时间分辨率成像成为了可能。压缩感知(CS)技术基于磁共振图像的稀疏特性，通过有选择性地采集K空间内少量重要数据，缩短信号采集时间，同时用稀疏重建算法实现原始信号的重构，保障重建图像质量[14]。加速因子是目前临床大多数磁共振设备在应用CS技术进行扫描时唯一可以调整的定量参数，可用于改善成像中不同组织对比需求下稀疏特性差异导致的图像质量下降。

本研究分析了不同CS加速因子，对吞咽Cine-MRI序列观察正常志愿者吞咽动作的影响，结果表明，加速因子为3时所获得的图像质量较优，但时间分辨率过低，一秒内仅能获得7帧图像，对吞咽动作各个阶段的区分力不够，不能满足临床对吞咽功能的评价要求。加速因子为8和10时可以获得极高的时间分辨率(51 ms/幅和40 ms/幅)，但磁共振图像信噪比较低、伪影严重，图像质量不符合临床诊断标准。这与既往将不同CS加速因子用于乳腺T1高分辨各项同性容积成像的研究结果相同[15]。其原因可能是由于CS加速因子过高时所采集的原始数据过少，难以重建出清晰的图像，且在信号差别较大的咽部，容易产生信号震荡，出现环形条状的截断伪影或磁敏感伪影。加速因子为5时，吞咽Cine-MRI图像的信噪比和对比噪声比仍保持较高水平，时间分辨率也较为可观，图像采集速度达到12幅/秒，能够准确显示吞咽过程的各个阶段，精细化地评估整个吞咽过程。既往探索不同加速因子用于磁共振颈动脉血管成像[16]和脑脊液4D流式磁共振成像[17]的研究中发现，加速因子为6时，可在减少40 %~50%扫描时间的同时保障图像质量和流动动力学评测的准确性。而针对心脏电影成像的研究[18]则发现，加速因子为4时，可在减少50%扫描时间的同时，保证图像质量满足诊断需求，并准确进行左心室心功能及心肌厚度测量。本次研究与其他部位研究中获得的最优加速因子有一定差异，原因可能是对血液、脑脊液等流体进行磁共振成像时，背景组织被抑制，仅关注流体信号，图像具有较高的稀疏特性[4]，因此在相对较高的加速因子下亦能获得较好的图像质量；而心脏、吞咽Cine-MRI中需要同时对流体和肌肉进行成像，图像的稀疏特性下降[19]，依赖数学运算提高稀疏特性，因此不适合选取过高的加速因子进行扫描。由此可见，使用压缩感知技术进行加速扫描前针对不同人体部位和不同扫描序列进行最适加速因子的测试研究是非常有必要的。

本研究的局限性在于：本研究为单中心研究，纳入志愿者均为健康志愿者，且样本量少，未对更多压缩感知加速因子进行测试。未来将进一步评估基于压缩感知技术的吞咽Cine-MRI应用于吞咽困难患者的可行性，并尝试探索更多不同倍数的压缩感知加速因子对图像质量和时间分辨率的影响。

综上所述，5倍压缩感知加速因子条件下获得的图像时间分辨率及图像质量俱佳，既能保证捕捉到吞咽全过程，又能清楚显示吞咽相关组织结构，是进行吞咽磁共振电影成像的最优选择。

参考文献

[1]Gupta A,McQuaid D,Dunlop A,et al.Measurement and incorporation of laryngeal motion using cine-MRI on an MR-linear accelerator to generate radiation therapy plans for early-stage squamous cell cancers of the glottis[J].Advances in Radiation Oncology,2024,9(6):101490.

[2]Chul Y K,Joon S L,Hojin P,et al.Swallowing analysis in hemi-tongue reconstruction using motor-innervated free flaps:A cine-magnetic resonance imaging study.[J].Head & neck,2023,45(5):1097-1112.

[3]Bonilha H S,Blair J,Carnes B,et al.Preliminary investigation of the effect of pulse rate on judgments of swallowing impairment and treatment recommendations[J].Dysphagia,2013,28(4):528-538.

[4]Lustig M,Donoho D,Pauly J M.Sparse MRI:The application of compressed sensing for rapid MR imaging[J].Magn Reson Med,2007,58(6):1182-1195.

[5]范伟雄,张添辉,钟炜,等.MRI人工智能辅助压缩感知心脏电影序列在心功能评估中的应用价值[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(9):79-81.

[6]张汉智,王植,孟祥虹,等.3D view序列联合压缩感知技术精准诊断踝周韧带损伤[J].中国CT和MRI杂志,2023,21(6):162-164.

[7]Lu L,Yanyu L,Jian W,et al.Free-breathing cardiac cine MRI with compressed sensing real-time imaging and retrospective motion correction:clinical feasibility and validation.[J].European radiology,2022,33(4):2289-2300.

[8]高萍,金川,王磊,等.颞下颌关节3种高清类动态序列成像质量评价[J].中国医学科学院学报,2023,45(1):50-56.

[9]Morotomi T,Iuchi T,Hashimoto T,et al.Image analysis of the inferior rectus muscle in orbital floor fracture using cine mode magnetic resonance imaging[J].Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery,2015,43(10):2066-2070.

[10]Martin A ,Martin K ,M N B,et al.High-resolution CINE imaging of active guided knee motion using continuously acquired golden-angle radial MRI and rotary sensor information.[J].Magnetic resonance imaging,2022,92 161-168.

[11]谢佳鑫,葛英辉,林青,等.心脏MR压缩感知电影序列用于评估先天性心脏病患者双心室功能[J].中国医学影像技术,2024,40(06):853-857.

[12]Kreeft A M,Rasch C R,Muller S H,et al.Cine MRI of swallowing in patients with advanced oral or oropharyngeal carcinoma:a feasibility study[J].Eur Arch Otorhinolaryngol,2012,269(6):1703-1711.

[13]Candes E J,Romberg J,Tao T.Robust uncertainty principles:exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J].IEEE Transactions on Information Theory,2006,52(2):489-509.

[14]李烁,王效春.压缩感知磁共振成像技术的临床应用进展[J].磁共振成像,2023,14(12):198-202.

[15]宁宁,梁泓冰,张丽娜,等.压缩感知技术对乳腺T1高分辨率各向同性容积激发序列的成像影响及序列优化[J].磁共振成像,2023,14(10):116-121,131.

[16]张浩南,宋清伟,王家正,等.初探压缩感知高倍数加速因子对颈动脉3D-TOF-MRA的影响[J].临床放射学杂志,2021,40(6):1079-1083.

[17]Elena J,Kristina S,Frank S,et al.Compressed-sensing accelerated 4D flow MRI of cerebrospinal fluid dynamics.[J].Fluids and barriers of the CNS,2020,17(1):43.

[18]Anne M B D,Sana B,Catrina H,et al.Compressed sensing MRI of different organs:ready for clinical daily practice?[J].European radiology,2020,30(1):308-319.

[19]A S Q,Fareena T,Irfan U,et al.Parallel implementation of L + S signal recovery in dynamic MRI.[J].Magma(New York,N.Y.),2020,34(2):1-11.

(收稿日期：2024-11-06)　(校对：韩敏求　排版：张鸿燊)