

径向K空间采样技术在胎儿心脏磁共振成像中的应用

张弘¹, 胡立伟¹, 王谦¹, 孙爱敏¹, 钟玉敏¹, 汪红志², 董素贞¹, 朱铭¹

1. 上海交通大学附属上海儿童医学中心影像诊断中心, 上海 200127; 2. 上海健康医学院医学影像学院, 上海 200237

【摘要】目的:探讨径向K空间采样技术在胎儿心脏磁共振成像(MRI)中的应用价值。**方法:**选取33例2015年1~10月胎儿心脏超声心动图检查后怀疑先天性心脏病畸形的孕妇行胎儿心脏MRI检查。孕妇平均年龄(28.63 ± 2.55)岁, 孕龄平均(28.57 ± 4.45)周。在其它扫描参数一致的前提下, 采用径向采样和笛卡尔采样两种不同的K空间填充方式, 测量升主动脉、心肌、羊水的图像信号强度值和噪声值, 并计算主动脉的对比噪声比。由两位有10年以上心血管异常MRI诊断经验的医生对两组图像进行5分制双盲主观评分, 评价整体图像质量、图像伪影和图像锐利度。**结果:**33例患者中, 径向采样和笛卡尔采样的主动脉对比噪声比有统计学差异($P < 0.05$), 径向K空间填充相比于笛卡尔填充在整体图像质量、图像伪影和图像锐利度方面主观评价有统计学差异($P < 0.05$), 径向K空间采样在抑制条带状伪影中有明显优势。**结论:**径向K空间采样是一项MRI K空间填充技术, 可有效抑制胎儿心脏MRI检查中的条带状伪影。胎儿MRI在诊断心外大血管畸形中有良好的空间分辨率和诊断优势, 可以作为胎儿心脏超声检查的补充手段。

【关键词】胎儿; 先天性心脏病; 径向采集; 磁共振成像

【中图分类号】R445.2

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)06-0580-04

Application of radial K-space acquisition in fetal cardiac MRI

ZHANG Hong¹, HU Li-wei¹, WANG Qian¹, SUN Ai-min¹, ZHONG Yu-min¹, WANG Hong-zhi², DONG Su-zhen¹, ZHU Ming¹

1. Center of Diagnostic Imaging, Shanghai Children Medical Center Affiliated to Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200127, China;

2. School of Medical Imaging, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 200237, China

Abstract: Objective To discuss on the application value of radial K-space acquisition in fetal cardiac MRI. **Methods** After the echocardiography for fetal heart from January to October 2015, 33 pregnant women with suspected congenital heart disease were examined by fetal cardiac MRI. The average age and average gestational age of selected pregnant women were respectively (28.63 ± 2.55) years and (28.57 ± 4.45) weeks. With the other scan parameters consistent, the different K-space acquisitions of radial and Castesian were applied to measure the image signal intensity and noise value of ascending aorta, cardiac muscle, amniotic fluid, and to calculate the contrast to noise ratio (CNR) of aorta. Two radiologists, with over 10 years of experience in diagnosing cardiovascular anomalies with MRI, independently scored the images for the overall image quality, degree of motion artifacts, and image sharpness. **Results** Statistical differences were found in the CNR of aorta between radial and Castesian acquisitions for 33 selected patients ($P < 0.05$). And the subjective evaluation for overall image quality, degree of motion artifacts, and image sharpness of radial and Castesian acquisitions showed statistical differences ($P < 0.05$). Compared to Castesian acquisition, radial K-space acquisition showed obvious advantages in banding artifact suppression. **Conclusion** Radial K-space acquisition, a MRI K-space filling technology, effectively suppresses the banding artifact in fetal cardiac MRI examination. And the fetal MRI can be a supplement for echocardiography because the fetal MRI shows good spatial resolution and advantages in diagnosing vascular malformation.

Key words: fetal; congenital heart disease; radial acquisition; magnetic resonance imaging

【收稿日期】2016-01-15

【基金项目】国家自然科学基金(30970795, 81101032, 81571628); 上海市卫生和计划生育委员会面上项目(201540048)

【作者简介】张弘(1977-), 本科, 主管技师, 主要研究方向: 磁共振技术, Tel: 13601753175, E-mail: 896405142@qq.com

【通信作者】董素贞(1979-), 博士, 副主任医师, 主要研究方向: 胎儿磁共振诊断, Tel: 18930830858, E-mail: dongsuzhen@126.com

前言

随着磁共振成像(MRI)采集技术和快速成像技术的发展,应用心电门控和隔肌导航技术已能清晰地显示儿童心脏舒张期的MRI图像^[1]。胎儿心脏相比于儿童心脏MRI检查更具有挑战性。首先胎儿MRI不能使用门控和导航技术,无法捕捉到胎儿心脏运动舒张期的薄层图像。董素贞等^[2]使用3 mm以

上的负间隔扫描能提供较好空间分辨率的胎儿MRI图像用于诊断,但并非是一个心动周期的图像。其次由于胎儿在不停运动,对扫描序列的扫描时间控制提出了更高的要求。平衡稳态自由进动序列(Balanced-Steady State Free Precession, B-SSFP)由于其极短的TR时间,其信号强度为 T_2/T_1 ,作为无需对比剂的白血序列已是胎儿心血管检查的首选序列^[3]。但该序列受磁场不均匀性的影响易产生条带状伪影,对胎儿心血管诊断带来极大的困难^[4]。本研究意在使用径向填充K空间的方式抑制这类伪影的产生,为胎儿心血管异常产前MRI的诊断提供有利条件。

1 方法

1.1 材料与方法

选取33例2015年1~10月心脏超声心动图检查后怀疑先天性心脏病的孕妇行胎儿心脏MRI检查,孕妇平均年龄(28.63 ± 2.55)岁,孕龄平均(28.57 ± 4.45)周。每位患者都由陪同家属签署胎儿MRI检查知情同意书。

1.2 图像采集

使用飞利浦1.5 T Achieva超导MRI, SENSE XL Torso 16通道线圈。孕妇仰卧位,如晚孕期也可侧卧位,为了减少幽闭恐惧症选择足先进。在胎儿矢状位或者冠状位的定位像基础上,扫描心脏横断位稳态自由进动回波序列。笛卡尔采集稳态自由进动回波序列参数:TR 3.8 ms, TE 1.9 ms, 旋转角度 80° , 层厚/层间距为 $6 \sim 7$ mm/ $-5 \sim -4$ mm, 带宽127.0 kHz, FOV 33 cm \times 33 cm, 平面分辨率2 mm \times 2 mm, 矩阵 252×252 , NEX 4, 并行采集加速因子2, 扫描时间46 s。径向采集稳定自由进动回波序列参数:TR 3.3 ms, TE 1.7 ms, 旋转角度 80° , 层厚/层间距 $6 \sim 7$ mm/ $-5 \sim -4$ mm, 带宽137.2 kHz, FOV 24 cm \times 33 cm, 平面分辨率2 mm \times 2 mm, 矩阵 252×252 , NEX 4, 扫描时间73 s。

1.3 图像分析

将图像数据导入GE ADW 4.6 Workstation定量分析图像的信号强度值和噪声值。主动脉、心肌、羊水作为信号强度值和图像噪声水平的测量点,放置圆形感兴趣区(Region of Interest, ROI), ROI范围定位 $3 \sim 4$ mm²。ROI面积要求覆盖主动脉起始处的 $3/4$ 为宜,为了减小误差,所有测量数据均由同一人在同一设备上重复测量3次,取其平均值即SD。主动脉图像对比噪声比的计算使用以下公式:

$$\text{CNR} = (\text{SI}_{\text{主动脉}} - \text{SI}_{\text{心肌}}) / \text{SD}_{\text{羊水}} \quad (1)$$

其中, $\text{SI}_{\text{主动脉}}$ 、 $\text{SI}_{\text{心肌}}$ 为ROI内的信号强度, $\text{SD}_{\text{羊水}}$ 为ROI内的信号标准差。

由两位10年以上心血管诊断经验的医生对两组

图像的整体图像质量、运动伪影、大血管的锐利度进行5分制双盲主观评分(5分:图像边界清晰、无伪影,可以用于诊断;4分:图像边界稍模糊,存在部分伪影,可以用于诊断;3分:图像边界模糊,存在明显伪影不在ROI内,基本可以诊断;1分和2分:图像模糊,伪影存在ROI位置,无法用于诊断)。并统计条带状伪影、胎儿运动伪影的出现频次。

1.4 统计学分析

两组数据分析均用Excel制表。并将数据导入SPSS 19.0、Graphpad Prism 5.0软件进行配对 t 检验, Kappa检验等统计学分析。配对 t 检验, $P < 0.05$ 时有统计学差异。Kappa检验 $P < 0.6$, 主观评价图像一致性较差; $0.6 < P < 0.8$, 图像一致性尚可; $0.8 < P < 1.0$, 图像一致性较好。

2 结果

从表1可得到主动脉血管图像的对比噪声比, 径向采集相比于笛卡尔采集有明显的优势(43.34 ± 7.54 vs 20.85 ± 3.63 , $P < 0.05$)。不同观察者评价两组数据的整体图像质量、图像伪影和图像锐利度, 径向采集的图像均好于笛卡尔采集的图像, 且有统计学差异($P < 0.05$)。主观评价两位观察者组内一致性评分中, 两位医生对整体图像质量、血管锐利度的一致性尚可, 但对图像伪影评价的一致性较差(表2)。

经专业MRI图像技术人员分析评估后发现, 两位评分医生对MRI伪影分类认识存在一定的分歧。经讨论后再次分析, 对图像伪影评分得到以下结论: 在33例MRI图像伪影评价中, 笛卡尔采样中条带状伪影17例, 胎儿运动伪影4例; 径向采样中条带状伪影0例, 胎儿运动伪影7例(图1)。但由于径向采集中没有使用并行采集技术, 导致扫描时间比笛卡尔采集多将近30 s, 径向采集发生运动伪影的例数比较笛卡尔采集稍有所增加。

表1 图像质量主观客观评价表

Tab.1 Subjective and objective evaluation of image quality

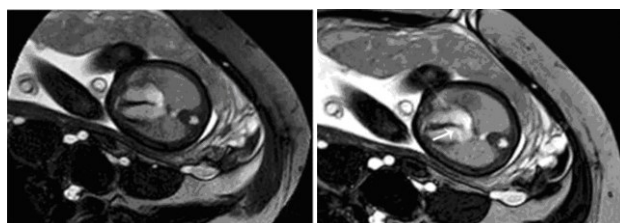
Item		Radial	Cartesian	P value
Aorta CNR		43.34 ± 7.54	20.85 ± 3.63	0.009
Image quality	Observer 1	4.42 ± 0.71	4.06 ± 0.93	0.008
	Observer 2	4.48 ± 0.71	4.21 ± 0.82	0.027
Artifacts	Observer 1	4.12 ± 0.86	3.61 ± 0.75	0.001
	Observer 2	4.21 ± 0.82	3.61 ± 0.83	0.002
Sharpness	Observer 1	4.30 ± 0.78	3.72 ± 0.64	0.001
	Observer 2	4.30 ± 0.78	3.72 ± 0.76	0.001

CNR: Contrast to noise ratio

表2 两位观察者组内一致性评价

Tab.2 Consistency in two observer groups

Item	Radial (Kappa)	Cartesian (Kappa)
Image quality	0.69	0.78
Artifacts	0.46	0.44
Sharpness	0.63	0.68



a: Radial K-space acquisition b: Cartesian K-space acquisition

图1 不同采集方法在稳态自由进动序列中产生的伪影分析

Fig.1 Artifacts of different acquisition methods in steady-state free precession (SSFP) sequence

White arrow in Fig.2b was the artifacts.

在33例检查者中有10例可以确诊胎儿患有复杂的先天性心脏病,包括双主动脉弓3例,右心发育不良1例,主动脉缩窄2例,完全性大动脉转位2例,右弓伴迷走左锁骨下动脉2例(图2)。胎儿心脏MRI成像在诊断先天性大血管畸形中具有明显的优势(图3)。

3 讨论

平衡稳态回波序列消除了3个空间编码梯度场对相位重聚的影响,可以达到真正的稳态^[5]。但平衡稳态回波序列对磁场不均匀比较敏感,磁敏感效应在气体与组织的界面处产生条纹状伪影。条纹状伪影随着主磁场强度增大、TR越长越明显^[6]。

双激发平衡稳态回波序列的一个特点是当脉冲在横向磁化矢量处于不同相位时进行激发,其产生的条纹状伪影移位方向也发生相应的改变。采用两次射频脉冲激发来采集两组回波,这两次射频脉冲激发时横

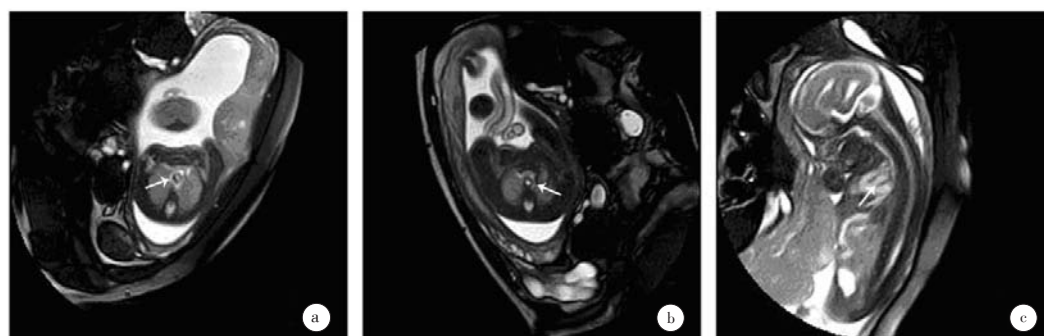


图2 胎儿心脏MRI

Fig.2 Fetal cardiac MRI

Fig.2a showed aortic arch was not degraded, forming a cyclic structure double bow wrapped airway; Fig.2b showed thin short aortic arch level; The complete transposition of great arteries in fig.2c showed the type of pulmonary front aorta.

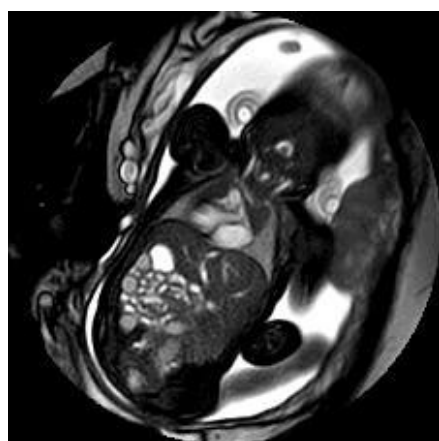


图3 径向采集的稳态自由进动扫描序列小孔径视野清晰显示胎儿大血管关系

Fig.3 Fetal vascular relationship clearly showed in small field of view of Balanced SSFP sequence in radial K-space acquisition

向磁化矢量处于不同的相位(如相差 180°),分别得到两组图像。这两组图像都可能有条纹状伪影,但条纹状伪影位移方向不同,把这两组图像融合成一组最终的图像^[7]。双激发平衡稳态回波序列特点:①明显减轻条纹状伪影;②TR相对较长情况下,仍可保证图像有较高的信噪比和较少的伪影。但双激发平衡稳态序列的成像时间过长,是相应的平衡稳态回波序列的两倍,无法应用于胎儿MRI的扫描。

径向采集相比于传统笛卡尔采集的优势在于采用稀疏的填充方式集中填充K空间的中心区域,有效减少扫描时间,可用于自由呼吸的心脏MRI。Wundrak等^[8]证明运用黄金角度 111.24° 的径向稀疏采样方式填充K空间能使采集过程更高效。Winkelmann等^[9]用公式证明P为斐波纳契数列时,黄金角度径向填充K空间方式

的回波序列采样效率SE均大于0.974。Bauer等^[7]研究无门控自由呼吸下径向采样稀疏的儿童心脏MRI图像与常规门控平衡稳态自由进动回波序列,16帧每秒的图像虽然降低组织对比度但时间分辨率有所提高。径向填充K空间的方式不单在稳定自由进动回波序列中有应用,在其它扫描序列如快速回波序列、梯度回波等也有广泛的应用。Edelman等^[10]运用径向的单次激发快速回波序列应用于肢体全长的MRI动脉成像扫描,实验证明采样过疏的非强化MRI动脉成像径向填充方式相比于笛卡尔填充方式,扫描时间能够减少到2 min以内。Chandarana等^[11]将径向填充K空间方法与传统笛卡尔法在儿童腹部强化后的T₁序列及梯度回波序列的图像比较,结果显示径向梯度回波序列的图像质量和肝边缘的锐利度更高,与传统方法相比有更好的病变显示能力。Lee等^[12]将径向技术应用于儿童腹部MRI扫描,结果证明径向填充K空间结合并行采集技术能有效降低快速自旋回波序列的运动伪影并提高图像质量。

本研究基于自由呼吸状况下的无心电门控技术,提出一种黄金角度径向采集填充K空间的胎儿MRI成像方法。径向采集的K空间填充方法能有效抑制平衡稳态自由进动序列引起的条带状伪影,其具有无卷积伪影、更小的运动伪影、无条纹状伪影的优势。结合径向采集的平衡稳态自由进动序列在胎儿MRI诊断心外大血管畸形中,有良好的空间分辨率和诊断优势,可以作为胎儿心脏超声检查的补充。随着未来更多的扫描序列在胎儿心脏MRI中的应用,相信径向采集技术会有极大的发展潜力。

【参考文献】

- [1] 朱铭,董素贞. 胎儿心脏畸形磁共振成像诊断[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2009, 15(5): 450-453.
ZHU M, DONG S Z. Diagnosis of fetal nervous system abnormalities by MRI[J]. Chinese Journal of Computed Medical

Imaging, 2009, 15(5): 450-453.

- [2] 董素贞,朱铭,李奋,等. 胎儿先天性心脏畸形MRI诊断的研究进展[J]. 中华临床医师杂志, 2012, 6(22): 7302-7304.
DONG S Z, ZHU M, LI F, et al. The research progress of MRI in diagnosing fetal congenital cardiac anomaly[J]. Chinese Journal of Clinicians, 2012, 6(22): 7302-7304.
- [3] ZHANG S, BLOCK K T, FRAHM J. Magnetic resonance imaging in real time: advances using radial FLASH[J]. J Magn Reson Imaging, 2010, 31: 101-109.
- [4] LIU J, SPINCEMAILLE P, CODELLA N C, et al. Respiratory and cardiac self-gated free-breathing cardiac CINE imaging with multi-echo 3D hybrid radial SSFP acquisition[J]. Magn Reson Med, 2010, 63(5): 1230-1237.
- [5] LEUPOLD J, HENNIG J, SCHEFFLER K. Alternating repetition time balanced steady state free precession[J]. Magn Reson Med, 2006, 55(3): 557-565.
- [6] CUKUR T, LEE J H, BANGERTER N K, et al. Non-contrast-enhanced flow independent peripheral MR angiography with balanced SSFP[J]. Magn Reson Med, 2009, 61(6): 1533.
- [7] BAUER R W, RADTKE I, BLOCK K T, et al. True real-time cardiac MRI in free breathing without ECG synchronization using a novel sequence with radial K-space sampling and balanced SSFP contrast mode[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29(5): 1059-1067.
- [8] WUNDRACK S, PAUL J, ULRICI J, et al. A small surrogate for the golden angle in time-resolved radial MRI based on generalized fibonacci sequences[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2014, 34(6): 1262-1269.
- [9] WINKELMANN S, SCHAEFFTER T, KOEHLER T, et al. An optimal radial profile order based on the Golden Ratio for timeresolved MRI[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2007, 26(1): 68-76.
- [10] EDELMAN R R, GIRI S, DUNKLE E, et al. Quiescent-inflow single-shot magnetic resonance angiography using a highly undersampled radial K-space trajectory[J]. Magn Reson Med, 2013, 70(6): 1662-1668.
- [11] CHANDARANA H, BLOCK K T, WINFELD M J, et al. Free-breathing contrast-enhanced T₁-weighted gradient-echo imaging with radial K-space sampling for paediatric abdominopelvic MRI[J]. Eur Radiol, 2014, 24(2): 320-326.
- [12] LEE J H, CHOI Y H, CHEON J E, et al. Improved abdominal MRI in non-breath-holding children using a radial K-space sampling technique[J]. Pediatr Radiol, 2015, 45(6): 840-846.

(编辑:陈丽霞)

(上接575页)

- [9] 王丹,沙翔燕,林海磊,等. 中上段食管癌图像引导放疗中摆位误差及靶区外放边界的确定[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2014, 34(8): 610-612.
WANG D, SHA X Y, LIN H L, et al. Evaluations of set-up errors and target margins for super and middle part of esophageal carcinoma in image guided radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2014, 34(8): 610-612.
- [10] 吴钦宏,李高峰,王婵,等. 基于锥形束CT体部肿瘤图像引导放疗的摆位误差分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2012, 21(1): 68-71.
WU Q H, LI G F, WANG C, et al. Analysis of setup errors on CBCT-based image guided radiation therapy for body tumors patients[J]. Chinese Journal Of Radiation Oncology, 2012, 21(1): 68-71.
- [11] 曹晓辉,刘明,翟福山,等. CBCT图像引导下胸部肿瘤放疗摆位误差及其外放边界[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2014, 23(1): 53-55.
CAO X H, LIU M, ZHAI F S, et al. Analysis of setup errors and

margin for thoracic carcinoma radiotherapy with cone-beam CT based image guidance[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2014, 23(1): 53-55.

- [12] VAN HERK M, REMEIJER P, RASCH C, et al. The probability of correct target dosage: dose-population histograms for deriving treatment margins in radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2000, 47(4): 1121-1135.
- [13] MCKENZIE A, VAN HERK M, MIJNHEER B, et al. Margins for geometric uncertainty around organs at risk in radiotherapy[J]. Radiother Oncol, 2002, 62(3): 299-307.
- [14] VAN HERK M, REMEIJER P, LEBESQUE J V, et al. Inclusion of geometric uncertainties in treatment plan evaluation[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2002, 52(5): 1407-1422.
- [15] VAN HERK M, REMEIJER P, LEBESQUE J V, et al. Errors and margins in radiotherapy[J]. Semin Radiat Oncol, 2004, 14(1): 52-64.

(编辑:薛泽玲)