

磁共振压缩感知技术在肿瘤影像检查中应用

郭效宾, 柯腾飞, 刘一帆, 保莎莎, 李志林, 廖承德

【摘要】 磁共振在肿瘤检查中有着无可比拟的优势且不可取代,但检查时间较长限制了其更广泛的临床应用。压缩感知技术是基于磁共振图像的稀疏特性,通过有选择性地采集少量重要数据并通过稀疏重建算法进行原始信号的重构,可在不牺牲空间分辨率的同时极大地缩短磁共振检查时间,能使磁共振在肿瘤检查中发挥更大作用。本文主要介绍压缩感知技术及其在临床肿瘤检查中的应用价值。

【关键词】 磁共振成像; 压缩感知; 乳腺肿瘤; 前列腺肿瘤

【中图分类号】 445.2; R737.9 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2020)12-1635-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.12.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



磁共振成像是现代医学成像技术的重要组成部分,与其它医学影像成像技术(X线、超声、CT和PET等)相比具有组织对比度好、无电离辐射、多参数成像等优点,且拥有多种成像技术,可用于分析人体组织成分、了解血流及代谢情况,在肿瘤的早期诊断、定性和定量分析及疗效评估中具有重要价值。但MRI检查时间较长,部分患者难以耐受,容易因身体发生移动而产生明显的运动伪影;在临床检查量日益增长的情况下,无论是医师还是患者都需要具有创新性的加速成像技术。2006年Candes等^[1]提出了压缩感知(compressed sensing, CS)理论,构建出一种新的磁共振信号采集和图像重建方法。CS技术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,减少计算量;同时,采用更新的算法实现原始信号的重构,保证重建图像的质量^[2]。结合压缩感知技术后,可极大地提高大多数MRI序列的扫描速度,且不牺牲医学影像质量。本文将对压缩感知的基本原理及其在肿瘤领域的应用进展予以分析和回顾。

压缩感知技术的原理及理论

磁共振成像是利用射频脉冲对置于静磁场中的物质进行激发、产生氢原子共振,借助接收线圈获取弛豫信号;并且通过梯度磁场对共振信号进行空间定位编码,将数据填充到K空间并通过傅里叶变换重建形成磁共振图像。以往主要借助磁场强度提升和优化K空间采集来提高成像速度。从起初的0.2T到当前临床普遍使用的1.5T和3.0T设备,过高场强设备不仅

昂贵且可能会刺激检查者的周围神经引起不适,而磁场强度的提升已经接近临床使用的极限。快速成像序列通过提高信号采集的速度来缩短扫描时间,但因受到硬件的制约,进一步提升的空间十分有限。

传统MRI过程中为了保证图像质量信号采集需符合奈奎斯特采样率条件,即采样率至少是信号最大频率的两倍,在通过傅里叶转换重建图像数据的过程中,需要K空间的信号数等于图像的像素。这样的数字信号采集不仅耗时长、数据量大、对存储要求高,而且会有大量冗余信号被丢弃。压缩感知技术,可以利用信号的稀疏特性来突破奈奎斯特采样率条件,从随机采样获取信号的离散样本,并用非线性迭代算法重建图像,磁共振设备采集的数据又天然符合压缩感知对数据稀疏性的要求^[3],两者结合而产生磁共振压缩感知技术是从图像采集与生成途径入手,利用磁共振信号的特性,大幅减少需要采集的数据,进而减少扫描时间。2007年Lustig等^[3]首次将压缩感知理论应用于磁共振成像,通过低于奈奎斯特定理的随机采样,重建恢复出原始信号,显著缩短扫描时间并提高MR图像的分辨率,在仿真测试中12倍加速度的条件下,仍然可以得到精确的重建图像。

压缩感知技术在肿瘤影像检查中的应用

根据国际癌症研究机构最新数据^[4],肺癌是发病率(占癌症总病例数的11.6%)和致死率(占癌症总死亡人数的18.4%)最高的恶性肿瘤,紧随其后的是乳腺癌(11.6%)、前列腺癌(7.1%)、结直肠癌(6.1%)、大肠癌(9.2%)、胃癌(8.2%)和肝癌(8.2%)。在乳腺癌、肝癌和前列腺癌的影像诊断中,MRI的敏感性、疾病检出率及诊断符合率均高于CT^[5-7]。但临床工作中磁共振检查因扫描时间长、易受呼吸心跳等活动影响,一定程度上限制了其临床应用。压缩感知技术对MRI

作者单位: 650118 昆明,云南省肿瘤医院(昆明医科大学第三附属医院)放射科

作者简介: 郭效宾(1995—),男,河南焦作人,硕士研究生,主要从事磁共振成像研究工作。

通信作者: 廖承德, E-mail: chengdeliao@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(地区)基金(81760316); 云南省卫生健康委员会医学学科带头人项目(D-2018009)

的加速效应改变了这一状况,降低了扫描时间,促进了磁共振检查在肿瘤影像检查中的应用。

1. CS 技术结合动态增强 MRI 的应用

动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI)通过动态测量注射顺磁性对比剂后的信号强度变化,提供有关肿瘤灌注及渗透性的关键信息,需要高时间和空间分辨率才能获得精确和可重复的肿瘤灌注数据。然而,传统数据采集方法限制了 DCE-MRI 同时获得较高的时间和空间分辨率。使用压缩感知技术后能大幅减少扫描时间,可在不牺牲空间分辨率的前提下获得较高时间分辨率,使 DCE-MRI 对肿瘤检测更敏感、诊断更明确。目前在乳腺癌、前列腺癌、肝癌及垂体肿瘤中均有基于压缩感知技术的 DCE-MRI 研究报道^[8-11]。

DCE-MRI 是乳腺癌重要的检查技术,对小病灶和非钙化病灶的检出率优于乳腺钼靶和超声^[12]。MRI 对乳腺良恶性肿瘤的鉴别主要依据对病灶形态学和动态曲线的评估,但是传统的 DCE-MRI 因时间分辨率不足,一般无法区分乳腺较小的动脉和静脉。在 Onishi 等^[8]对 25 例女性乳腺疾病患者的研究中,恶性病灶的动脉和静脉显影时间间隔明显短于良性者,使用基于压缩感知技术的快速 DCE-MRI 能够单独识别乳腺动/静脉,可以更好的鉴别乳腺良恶性肿瘤。在 Benkert 等^[13]的研究中,对 24 例患者进行了双侧乳腺传统的容积式插入法屏气检查(volumetric interpolated breath-hold examination, VIBE)序列和结合压缩感知的压脂快速采集弛豫增强(Dixon rapid acquisition relaxation enhanced, Dixon-RARE)序列扫描,后者比前者的时间分辨率更高、脂肪抑制改善、总体扫描时间缩短。Vreemann 等的研究中^[14],30 例女性在 3.0T 磁共振成像系统上使用 CS-VIBE 序列和普通 VIBE-Dixon 序列进行扫描和对比,结果显示基于压缩感知的 VIBE 序列可提高图像的空间分辨率,并有利于生成多平面重建图像。在对病变进行形态学评估时,使用压缩感知序列可得到与普通 VIBE-Dixon 序列相似的图像质量,但扫描时间缩短了 18 倍。

前列腺癌是全球男性发病率排名第二的恶性肿瘤,传统诊断途径包括血清前列腺特异性抗原和超声引导下前列腺穿刺活检,但即使穿刺活检也可能会漏诊约 20% 的患者, MRI 提供了比其他方法更好的成像效果,提供了前列腺癌病灶分期、分级与精准定位等准确信息,其漏诊率甚至低于超声引导的前列腺癌活检^[15]。在 Rosenkrantz 等^[9]的研究中,对比了 20 例前列腺癌患者的标准方法和基于压缩感知的两种 DCE-MRI,后者在图像质量、解剖细节的清晰度和病灶的显著性等方面都比前者得到明显的改善。Winkel 等^[16]

的研究也证明压缩感知技术提高了 MR 多参数成像的诊断效能。在压缩感知技术的支持下,磁共振前列腺检查的时间更短、诊断符合率更高、图像质量更好且解剖细节更清晰。

肝癌是全球致死率极高的恶性肿瘤。肝癌的早期发现、及时治疗可显著提高患者的生存率,随着磁共振功能成像技术的发展及临床经验的积累,提高了临床对早期肝癌的诊断能力。与 CT 和超声相比, MRI 对肝癌的定性诊断具有很好的敏感性和特异性^[17]。但由于腹部动态增强扫描时间长、患者不能配合长时间闭气等问题,图像中普遍存在难于克服的运动伪影。Yoon 等^[10]将压缩感知技术应用于肝脏磁共振扫描,收集了 51 例呼吸衰竭高危患者的图像,由 4 位放射科医师对扫描时间、运动伪影和图像质量进行了评估,与传统的闭气法 T₁WI 序列相比,采用 CS 技术的自由呼吸序列的平扫、增强后动脉期和门静脉期图像上运动伪影较少,图像质量更高。Yoon 等^[18]对 127 例肝脏动态增强扫描的回顾性分析认为,采用 CS 技术可达到单次屏气获得最佳时间的双动脉期成像,并可减少呼吸运动伪影。Chandarana 等^[19]的研究也证明,在自由呼吸期间,可以利用压缩感知与其他技术结合来进行增强多期肝脏磁共振检查,可以克服腹部和肝脏常规 DCE-MRI 的许多缺点,降低检查失败率。Shaikh 等^[20]认为,在常见情况下,呼吸运动影响了动脉多期图像的获取,通过压缩感知技术可挽救图像质量、减少运动伪影,从而降低了检查失败的可能性,节省了医疗成本,国内学者刘锴等^[21]的相关研究也得出了相似结论。因此,结合了 CS 技术的 DCE-MRI 序列,可被更广泛的应用于难以制动中老年人或体弱患者中。

垂体位于血脑屏障之外,且解剖结构精细,动态增强序列可用于发现垂体微小病灶,被认为是检查垂体病变的金标准,而以往的扫描需 150~240s。但借助 CS 技术的 DCE-MRI 扫描序列,可获得时间和空间分辨率均较高的垂体图像,并减低对运动和血流的敏感性,改善了脂肪抑制效果^[11]。

肿瘤血管生成在实体肿瘤的发生、发展、侵袭和转移中起着关键作用,并显著影响肿瘤的生物行为 and 预后,肿瘤血管不仅提供肿瘤生长和转运所需的营养物质,而且是肿瘤细胞转移的通道。因此了解肿瘤内部的血供情况对其诊断及治疗都提供极有价值的信息。已有许多研究者发现结合压缩感知的动态增强序列可额外获取灌注参数。如 Chandarana 等^[22]采用基于压缩感知的高时间分辨率的动态增强序列进行肝脏扫描,和传统序列相比,无需注射额外的对比剂或增加扫描时间,即可在获取高时间、空间分辨率形态学图像

的同时获取灌注参数。这些指标对临床各期肝硬化的改变尤为敏感,并满足了在自由呼吸下采集数据,为肝脏 MR 成像提供了一种很有前途的新扫描模式。Chen 等^[23]对家兔进行的实验也证实 CS 技术可以提高 DCE-MRI 的时间分辨率,在获得高质量图像的同时能获取有效的肾脏灌注数据。Parikh 等^[24]在 22 例膀胱癌患者中利用 CS 技术进行磁共振泌尿系水成像和自由呼吸下的多期增强盆腔扫描,通过利用新型的“自由呼吸连续径向采集”和“灵活的压缩传感重建”方法,实现了膀胱癌的高时间分辨率成像并同时获取了灌注参数。上述结果表明,结合压缩感知技术不需要额外注射对比剂或增加扫描时间,即可同时完成膀胱肿瘤的形态学及灌注成像检查。

展望未来会有更多 MRI 技术(MRI 独有的肺灌注、动脉自旋标记、肺灌注定量、扩散加权成像技术等)与压缩感知技术结合,使其应用更广泛,将会为肺部肿瘤的定性、定量评价带来新局面。

2. CS 技术结合 MRS 的应用

磁共振波谱成像(MRS)以无创的方式测定活体组织的代谢物浓度,可用于鉴别良恶性肿瘤,为制订治疗方案提供有价值的信息。在 Park 等^[25]对荷瘤大鼠 MRS 检查,证实采用 CS 技术比以往的三维 EPI MRS 具有更高的空间分辨率,有助于无创性预测肿瘤的组织类型。

但由于 MRS 检查时间长,尚未在肿瘤患者中普遍应用。Geethanath 等^[26]回顾性研究了 6 例健康志愿者、2 例脑肿瘤(恶性胶质瘤)和 2 例前列腺癌患者的 MRS 数据,通过使用压缩感知技术,可将采集时间减少到 80% 或更多,并且 MRS 信息的损失可忽略不计。Hu 等^[27]通过物理及动物实验,利用超极化光谱中的稀疏性、结合压缩感知技术,使 MRS 在保持代谢物峰比准确性的同时,提高了信噪比。

3. CS 技术结合 DTI 的应用

DTI 是高危神经外科手术前的核心检查,是治疗前手术计划必备的磁共振检查序列,但当遇到交叉纤维和复杂的纤维通道时,这种技术是有限的。扩散谱成像(diffusion spectrum imaging, DSI)是一种能够分辨交叉光纤的高阶扩散技术,这一高阶技术已被证明在脑肿瘤存在的情况下,可改善白质纤维束成像的质量^[28]。但由于 DSI 序列中需要的梯度方向数多,数据采集时间过长,容易导致患者无法耐受和检查失败。随着 CS 技术的进步,有望通过它来减少扫描时间,弥补传统 DSI 技术的缺陷。在 Young 等^[29]对 25 例颅内肿瘤患者的 CS-DSI 和 DTI 对比研究中,对患者运动和语言束的显示 CS-DSI 优于 DTI,支持使用 CS-DSI 而不是 DTI 来评价受颅内占位影响的白质纤维。

以上这些结果提示,CS-DSI 能在缩短成像时间的同时获得优于 DTI 的显示效果,帮助神外科医师更好地制定和完成手术计划。

4. CS 技术结合磁共振肺部快速成像的应用

肺癌是全球最常见的恶性肿瘤,目前肺癌筛查多采用 X 线或 CT,但是 X 线和 CT 均有电离辐射。根据 Sommer 等^[30]使用非增强磁共振检查与低剂量 CT 进行的肺癌筛查和干预试验, MRI 由于对软组织分辨率较高,对检出肺部恶性结节比良性结节更敏感,可能成为肺癌早期筛查的一种选择。然而,目前的磁共振肺部扫描多采用长时间屏气的方法减少运动伪影,但多数病人难以完美屏气,使磁共振肺癌筛查远未普及。根据 Wang 等^[31]的研究,利用压缩感知技术与现有的并行采集技术结合,形成新的肺部快速成像序列,可以比预期整体成像加速 20 倍或更高,最终实现 MRI 肺癌筛查中的自由呼吸和无心电图控获取。这将使无辐射肺癌筛查成为可能,降低大众因 X 线辐射而造成的焦虑。

总结

肿瘤患者进行影像检查时,往往因疼痛、屏气困难、意识障碍等原因不易保持较长时间的静止状态,从而产生伪影,降低图像质量。压缩感知技术不但能解决这一问题,还可提高图像质量和诊断准确性。对比以往需要较长扫描时间的 MRS 和 DSI 等序列,CS 技术所带来的优势增加了这些技术的适用性,使肿瘤定性定量分析、术前计划制定及术后评价更加精准,同时也降低了选择电离辐射检查给患者带来的风险。然而压缩感知技术并非万能,其应用基于图像信号中的稀疏性、不相干性与非线性迭代重建性,在较低稀疏性的普通 2D 形态像序列中并不能得到很高的加速倍数,与较为成熟的并行采集等技术相比优势并不大,这将会引发序列的革新设计。另外,重建算法对压缩感知技术尤为重要,临床需要与底层算法的开发能否更好的结合,这些都尚未得到答案。目前的算法与序列设计仍需大量的临床试验去改进,针对不同组织器官选取不同的参数,并从中找到采集时间与图像质量间的平衡点。时间将告诉我们压缩感知技术会否从根本上改变 MRI 在肿瘤影像检查中的应用。

参考文献:

- [1] Candès E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal frequency information: information theory[J]. IEEE Transactions, 2006, 52(2): 489-509.
- [2] 夏春潮, 李真林. 医学影像技术研究进展及展望[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(2): 89-94.
- [3] Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: the application of compressed sensing for rapid MR imaging[J]. Magn Reson Med,

- 2007,58(6):1182-1195.
- [4] Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2018; GLOBOCAN estimates of incidence and mortality world-wide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2018, 68(6):394-424.
- [5] 韩贺山, 汤易, 崔宁宁, 等. MG、CT 与 DCE-MRI 三种影像学技术在乳腺癌患者腋窝淋巴结有无转移中的诊断价值研究[J]. 吉林医学, 2019, 40(11):2469-2471.
- [6] 韩欣平. 肝脏 CT 与肝脏 MRI 对肝癌的诊断价值比较[J]. 临床医学研究与实践, 2019, 31(4):101-102.
- [7] 苏宁, 何鑫. 弥散加权像在胸部 MRI 检查中的应用研究[J]. 影像研究与医学应用, 2019, 21(3):43-44.
- [8] Onishi N, Kataoka M, Kanao S, et al. Ultrafast dynamic contrast-enhanced MRI of the breast using compressed sensing: breast cancer diagnosis based on separate visualization of breast arteries and veins[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 47(1):97-104.
- [9] Rosenkrantz AB, Geppert C, Grimm R, et al. Dynamic contrast-enhanced MRI of the prostate with high spatiotemporal resolution using compressed sensing, arallel imaging, and continuous golden-angle radial sampling: preliminary experience[J]. J Magn Reson Imaging, 2015, 41(5):1365-1373.
- [10] Yoon JH, Yu MH, Chang W, et al. Clinical feasibility of free-breathing dynamic T₁-weighted Imaging with gadoteric acid-enhanced liver magnetic resonance imaging using a combination of variable density Sampling and compressed sensing[J]. Invest Radiol, 2017, 52(10):596-604.
- [11] Rossi Espagnet MC, Bangiyev L, Haber M, et al. High-resolution DCE-MRI of the pituitary gland using radial k-Space acquisition with compressed sensing reconstruction[J]. AJNR, 2015, 36(8):1444-1449.
- [12] de Martini W, Lehman C. A review of current evidence-based clinical applications for breast magnetic resonance imaging[J]. Top Magn Reson Imaging, 2008, 19(3):143-150.
- [13] Benkert T, Block KT, Heller S, et al. Comprehensive dynamic contrast-enhanced 3D magnetic resonance imaging of the breast with fat/water separation and high spatiotemporal resolution using radial sampling, compressed sensing, and parallel imaging[J]. Invest Radiol, 2017, 52(10):583-589.
- [14] Vreemann S, Rodriguez-Ruiz A, Nickel D, et al. Compressed sensing for breast MRI: resolving the trade-off between spatial and temporal resolution[J]. Invest Radiol, 2017, 52(10):574-582.
- [15] Moore CM, Robertson NL, Arsanious N, et al. Image-guided prostate biopsy using magnetic resonance imaging-derived targets: a systematic review[J]. Eur Urol, 2013, 63(1):125-140.
- [16] Winkel DJ, Heye TJ, Benz MR, et al. Compressed sensing radial sampling MRI of prostate perfusion: utility for detection of prostate cancer[J]. Radiology, 2019, 290(3):702-708.
- [17] Horvat N, Monti S, Oliveira BC, et al. State of the art in magnetic resonance imaging of hepatocellular carcinoma[J]. Radiol Oncol, 2018, 52(4):353-364.
- [18] Yoon JK, Kim MJ, Lee S. Compressed sensing and parallel imaging for double hepatic Aarterial phase acquisition in gadoterate-enhanced dynamic liver magnetic resonance imaging[J]. Invest Radiol, 2019, 54(6):374-382.
- [19] Chandarana H, Feng L, Block TK, et al. Free-breathing contrast-enhanced multiphase MRI of the liver using a combination of compressed sensing, parallel imaging, and golden-angle radial sampling[J]. Invest Radiol, 2013, 48(1):10-16.
- [20] Shaikh J, Stoddard PB, Levine EG, et al. View-sharing artifact reduction with retrospective compressed sensing reconstruction in the context of contrast-enhanced liver MRI for hepatocellular carcinoma (HCC) screening[J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 49(4):984-993.
- [21] 刘锴, 陈财忠, 温喜喜, 等. 压缩感知联合并行成像在肝脏多动脉期增强磁共振成像中的应用[J]. 放射学实践, 2019, 34(11):1182-1185.
- [22] Chandarana H, Block TK, Ream J, et al. Estimating liver perfusion from free-breathing continuously acquired dynamic gadolinium-ethoxybenzyl-diethylenetriamine pentaacetic acid-enhanced acquisition with compressed sensing reconstruction[J]. Invest Radiol, 2015, 50(2):88-94.
- [23] Chen B, Zhao K, Li B, et al. High temporal resolution dynamic contrast-enhanced MRI using compressed sensing-combined sequence in quantitative renal perfusion measurement[J]. Magn Reson Imaging, 2015, 33(8):962-969.
- [24] Parikh N, Ream JM, Zhang HC, et al. Performance of simultaneous high temporal resolution quantitative perfusion imaging of bladder tumors and conventional multi-phase urography using a novel free-breathing continuously acquired radial compressed-sensing MRI sequence[J]. Magn Reson Imaging, 2016, 34(5):694-698.
- [25] Park I, Hu S, Bok R, et al. Evaluation of heterogeneous metabolic profile in an orthotopic human glioblastoma xenograft model using compressed sensing hyperpolarized 3D ¹³C magnetic resonance spectroscopic imaging[J]. Magn Reson Med, 2013, 70(1):33-39.
- [26] Geethanath S, Baek HM, Ganji SK, et al. Compressive sensing could accelerate ¹H-MR metabolic imaging in the clinic[J]. Radiology, 2012, 262(3):985-994.
- [27] Hu S, Lustig M, Chen AP, et al. Compressed sensing for resolution enhancement of hyperpolarized ¹³C flyback 3D-MRS[J]. J Magn Reson, 2008, 192(2):258-264.
- [28] Fernandez-Miranda JC, Pathak S, Engh J, et al. High-definition fiber tractography of the human brain: neuroanatomical validation and neurosurgical applications[J]. Neurosurgery, 2012, 71(2):430-453.
- [29] Young RJ, Tan ET, Peck KK, et al. Comparison of compressed sensing diffusion spectrum imaging and diffusion tensor imaging in patients with intracranial masses[J]. Magn Reson Imaging, 2017, 36(2):24-31. DOI:???
- [30] Sommer G, Tremper J, Koenigkam-Santos M, et al. Lung nodule detection in a high-risk population: comparison of magnetic resonance imaging and low-dose computed tomography[J]. Eur J Radiol, 2014, 83(3):600-605.
- [31] Wang YX, Lo GG, Yuan J, et al. Magnetic resonance imaging for lung cancer screen[J]. J Thorac Dis, 2014, 6(9):1340-1348.

(收稿日期:2020-05-28 修回日期:2020-07-12)