

基于主成分迭代支集检测的多对比度 磁共振快速成像

彭 玺 宋光华 安一硕 刘元元 王圣如 刘 新 梁 栋*

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 很多磁共振成像应用(如 T1、T2 参数成像)需要连续采集一系列不同对比度的图像。丰富的对比度机制反映了人体组织的内在特性,为临床提供了有效的定量诊断手段。然而,由于扫描时间过长,这种方法在临床上的应用受到一定的限制。近几年兴起的压缩感知理论在磁共振快速成像方面显示了巨大的潜能。其中,学者们提出一种基于主成分分析的快速磁共振成像方法。该方法从已知的解析物理模型和参数范围中训练主成分,并通过截断的方式利用图像序列的时域稀疏性。但是,当这种截断先验信息不准确时,上述方法可能会产生模型误差。本文通过采用迭代支集检测的方法实现主成分系数支集的适应性估计。文章最后通过两组人体膝盖数据的重建实验,验证了该方法的有效性。

关键词 多对比度磁共振成像; 压缩感知; 主成分分析; 迭代支集检测

Accelerating T2 Mapping using ISD in the Spatial-PCA Domain

PENG Xi SONG Guang-hua AN Yi-shuo LIU Yuan-yuan WANG Sheng-ru LIU Xin LIANG Dong*

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract A series of multi-contrast MR images are usually required in various MR applications, such as T1 and T2 mappings, which provide quantitative information of inherent tissue properties for diagnosis purpose. However, its clinical application is limited by the long scanning time. The emerging theory of compressed sensing has shown great potential in accelerating MR acquisitions. Recently, a principal component analysis based method has been proposed exploiting the temporal sparsity via truncated PCs based on the knowledge of the analytic model and possible parameter range. However, it may generate model errors when such prior information is not accurate. In this work, the support of the PC coefficients were detected in a more adaptive way using iterative support detection. Reconstructions based on two knee data sets were conducted to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords multi-contrast magnetic resonance imaging; compressed sensing; principal component analysis; iterative support detection

1 引 言

磁共振成像是一种非常有效的非侵入式医学诊断

工具,在病理研究、疾病诊断、病变分类等方面都具有广泛的应用^[1-3]。很多磁共振成像实验(如 T1、T2 参数成像)需要连续采集一系列不同对比度的图像。

丰富的对比度机制反映了人体组织的内在特性,为临

基金项目:国家自然科学基金(11301508, 61102043, 81120108012),深圳市基础研究(JC201104220219A),深圳市孔雀计划(KQCX20120816155710259)。

作者简介:彭玺,博士,助理研究员,研究方向为磁共振快速成像模型及方法、多维信号处理;宋光华,研究助理,研究方向为基于压缩感知的快速磁共振成像;安一硕,研究助理,研究方向为基于压缩感知的快速磁共振成像;刘元元,研究助理,研究方向为压缩感知及并行成像;王圣如,研究助理,研究方向为基于压缩感知的快速磁共振成像;刘新,研究员,研究方向为心血管磁共振成像、磁共振引导微创治疗。*通讯作者:梁栋,博士,副研究员,研究方向为压缩感知等快速磁共振成像理论与应用, E-mail: dong.liang@siat.ac.cn。

床提供了有效的定量诊断手段。然而, 由于整体扫描时间相对较长、且容易引入运动伪影, 该方法在临床上的应用受到一定程度的限制。

压缩感知理论 (Compressed Sensing, CS) 是近年兴起的一种全新的系统理论框架。压缩感知理论指出, 在满足特定的数学条件下, 仅通过欠采样数据即可实现图像的精确重构^[5]。该理论在磁共振成像的各个领域中表现出巨大的应用潜能^[4-6]。其中, 前期提出的应用于心脏动态成像的局部可分离模型方法^[7]及 *k-t* PCA 方法^[8]均已成功应用于加速多对比度图像序列的重建。这两种方法都是同时利用空间和时间的稀疏性 (冗余性), 表现出良好的重建性。

近期, 学者们提出了一种基于模型的主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 成像方法^[4]。该方法基于已知的解析模型和可能的物理参数范围来学习截断的主成分, 进而利用时域上的冗余信息。然而, 这种硬截断需要可靠的先验信息作为依据。在某些情况下, 这些信息无法获取。一种可选的方法是保留所有可能出现的主成分, 仅对不确定的成分设置罚函数, 即 CS 中的部分已知支集理论 (Partially Known Support, PKS)^[9]。同样, 支集信息也可以在重建过程中运用迭代支集检测技术 (Iterative Support Detection, ISD) 逐步确定^[10]。ISD 技术已经成功运用于心脏动态磁共振成像^[11]、动态对比增强成像^[12]以及 T1 ρ 参数成像^[13]。

本文提出一种基于 ISD 的主成分参数成像方法。该方法先从低分辨率数据中训练得到主成分, 再以迭代的方式实现图像重建和支集检测。具体而言, 在每一步迭代中, 通过求解一个截断的 L_1 范数最小化问题来估计图像序列; 并利用一个逐次递减的阈值以检测主成分系数的支撑信息。本文最后通过两组人体膝盖实验数据的重建实验验证了该方法的有效性。

2 提出的方法

2.1 基于 PCA 的压缩感知图像序列重构

本节以 T2 参数成像实验为例, 介绍基于 PCA 的压缩感知图像序列重建模型。在不同回波时间获取的 T2 加权图像, 其信号强度在每个空间位置均呈指数衰减。而该指数模型可以直接应用于重构模型中, 但这可能会提高计算的复杂度。为了避免非线性的图像模型, 可以采用若干主成分线性组合的形式来表示信

号^[4], 其矩阵表示如下:

$$\mathbf{P} = \mathbf{M}\mathbf{B} + \mathbf{E} \quad (1)$$

其中 \mathbf{P} 是图像序列矩阵, 大小为 $(N_x \times N_y) \times N$ 。T2 加权图像 $(N_x \times N_y)$ 以图像矢量的形式存储于 \mathbf{P} 的每一列中。 N 表示图像的个数, 也是采样的回波时间个数。 \mathbf{B} 是一个 $N \times N$ 的矩阵, 矩阵的列向量表示主成分向量, 按照重要性由大到小排列。 \mathbf{M} 是一个大小为 $(N_x \times N_y) \times N$ 的矩阵, 包含了图像中所有像素的主成分系数。 \mathbf{E} 是误差矩阵。

2.2 基于 PCA-ISD 的压缩感知图像序列重构

PCA 作为一种有效的线性化方法, 能够在模型精度和计算复杂度之间取得较好的权衡。如果先验知识 (解析物理模型和可能的参数范围) 是已知的, 那么只需要较少的主成分就能准确地表示图像序列。然而, 在缺少先验信息的情况下, 需要保留大多数主成分以获取信号中任何可能存在的信息。此外, 信号的大部分能量将主要分布于重要的主成分上, 进而可以实现稀疏表示。

本文提出应用迭代支集检测 (ISD) 技术, 自适应地学习主成分系数的支撑信息, 进而获得更精确的重构。主成分系数可以通过欠采样的 k 空间数据, 迭代地求解一个截断的 L_1 最小化问题而估计得到:

$$\hat{\mathbf{M}}^{(k)} = \arg \min_{\mathbf{M}} \|\mathbf{F}_u \mathbf{M} \mathbf{B} - \mathbf{D}\|_2^2 + \lambda \sum_i \|\Delta_i^{(k-1)} \cdot \mathbf{M}_i\| \quad (2)$$

其中, 矩阵运算符 \mathbf{F}_u 表示空间域的欠采样傅立叶编码; \mathbf{D} 是 k 空间数据矩阵; \mathbf{M}_i 代表 \mathbf{M} 矩阵的第 i 列, 表示对应所有空间位置的第 i 个主成分系数矢量; λ 是正则化参数, 主要控制数据一致性与时域稀疏性之间的权衡关系; $\Delta_i^{(k)}$ 是一个二值向量, 用来表示第 i 个主成分系数矢量在第 k 次迭代中的支撑信息:

$$\Delta_i^{(k)}(n) = \begin{cases} 1, & \mathbf{M}_i^{(k)}(n) < \tau^{(k)} \\ 0, & \mathbf{M}_i^{(k)}(n) \geq \tau^{(k)} \end{cases} \quad (3)$$

τ 是一个设计的阈值, 通常由一个相对较大的数值开始, 并逐步减小:

$$\tau^{(k)} = \|\mathbf{M}^{(k)}\|_{\max} / q^{k+1} \quad (3)$$

在每一步迭代中, 运用非线性共轭梯度法 (Nonlinear Conjugate Gradient) 求解 $\hat{\mathbf{M}}^{(k)}$, 并更新 $\tau^{(k)}$ 与 $\Delta_i^{(k)}$ 。迭代结束后, 通过对重建所得的 T2 加权图像序列进行标准的指数模型最小二乘法拟合, 即可得到 T2 参数图像。

3 实验设置

在 3T 磁共振成像扫描仪 (MAGNETOM Trio, Siemens) 上分别获取两组膝盖全采样数据。成像实验采用多对比度自旋回波序列 (Multi-Contrast Spin Echo), 以获得 10 幅 T2 加权的图像, TE 为 20.4 ~ 112.2 ms, 其等距回波间隔为 10.2 ms。层面厚度设置为 3 mm, TR 时间为 1500 ms, 空间分辨率为 1 mm × 1 mm。全采样 k 空间信号经由一个 8 通道柔性线圈获取。全采样信号的傅立叶重构图像作为标准参考图像。

欠采样信号通过对全采样信号直接降采样获得。本实验采用相位编码方向随机变密度的欠采样模式, 净采样因子 $R=3$ 。其中, k 空间中心区域保持全采样, 以确保欠采样信号具有足够的信噪比。

4 算法实现

主成分矩阵 \mathbf{B} 通过直接对欠采样信号的补零傅立叶重建做主成分分析获得。一般而言, 正则化参数 λ 与噪声等级成正比。其中, 噪声等级可以从图像的背景区域估计得到。本实验通过选取一定范围内的参

数进行多次重建, 确定最优的正则化参数。对于 PCA 方法, λ 为 $1e^{-2}$ 时重建误差最小; 而对于 PCA-ISD 方法, λ 为 $7e^{-3}$ 时, 重建误差最小。支集检测参数 q 体现了 ISD 技术重建精度和收敛速率之间的权衡关系。在本实验设置中, 令 $q=1.5$ 时, 经过 3 次迭代后即可产生较好的重建结果。

对于多线圈数据, 本文所提出的方法先分别作用于单个线圈; 然后对各个线圈的重建图像做平方和的平方根运算 (Square Root of Sum of Squares, SoS), 以获得最终图像。

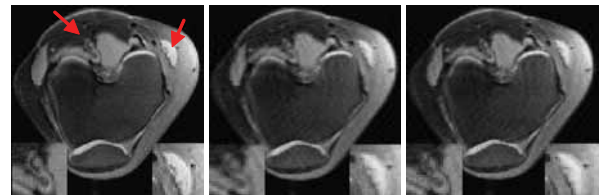
5 实验结果

回波时间 $TE=22.4$ ms 时的重建图像见图 1 和图 2。由图可知, PCA 和 PCA-ISD 的重建图像都表现出一些低分辨率图像的特征和 Gibbs 环伪影 (尤其是图像中心光滑区域)。然而, 正如所期望的一样, 本文提出的 PCA-ISD 方法较标准的 PCA 方法恢复了更多细节信息 (箭头所指示的放大区域)。这是由于 ISD 技术的引入, 使得重要的非零系数被成功地检测出来。在重要系数恢复的同时, 通过最小化 L_1 约束项, 使得剩



(a) 全采样图像 (b) PCA (c) PCA-ISD

图 1 膝盖数据 1 欠采样重建对比结果
($R=3$, $TE=22.4$ ms)



(a) 全采样图像 (b) PCA (c) PCA-ISD

图 2 膝盖数据 2 欠采样重建对比结果
($R=3$, $TE=22.4$ ms)

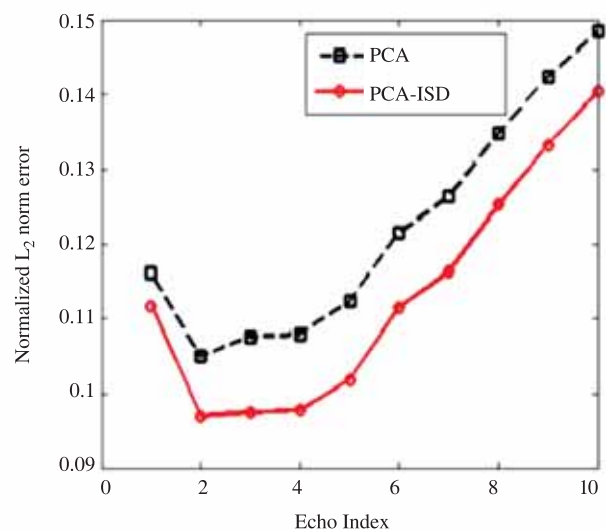
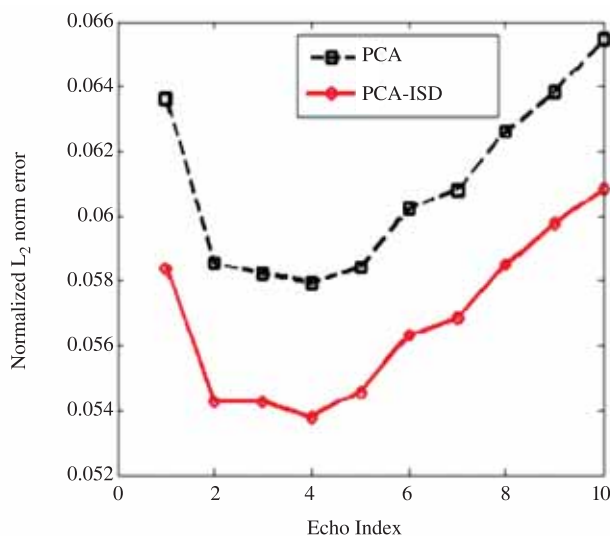


图 3 膝盖数据 1 (左) 和数据 2 (右) 欠采样重建误差对比

余的主成分表达更稀疏, 从而得到较好的重建结果。

图 3 给出了各个回波时间下 PCA 方法和 ISD-PCA 方法重建图像的 L_2 范数误差。由图 3 可以看出, 本文所提出的 PCA-ISD 方法在各个回波时间的图像重建质量都要优于标准的 PCA 方法。

6 结 论

本文提出一种基于迭代支集检测的主成分多对比度图像序列的快速重建方法。该方法基于压缩感知的系统理论框架, 通过对主成分系数支撑信息的自适应检测, 提高重建图像质量。由实验结果可知, 本文提出的 ISD-PCA 方法较标准的 PCA 方法能够获得更优的图像质量和更多的细节信息。

参 考 文 献

- [1] Majumdar A, Ward R K. Accelerating multi-echo T2 weighted MR imaging: Analysis prior group-sparse optimization [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2011, 210(1): 90-97.
- [2] Weissleder R, Mahmood U. Molecular imaging [J]. *Radiology*, 2001, 219: 316-333.
- [3] Lin F H, Wald L L, Ahlfors S P, et al. Dynamic magnetic resonance inverse imaging of human brain function [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2006, 56: 787-802.
- [4] Huang C, Graff C G, Clarkson E W, et al. T2 mapping from highly undersampled data by reconstruction of principal component coefficient maps using compressed sensing [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2012, 67(5): 1355-1366.
- [5] Lustig M, Donoho D, Pauly J M. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2007, 58(6): 1182-1195.
- [6] Doneva M, Bönert P, Eggers H, et al. Compressed sensing reconstruction for magnetic resonance parameter mapping [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2010, 64 (4): 1114-1120.
- [7] Haldar J P, Liang Z P. Spatio-temporal imaging with partially separable functions: a matrix recovery approach [J]. *International Society for Burn Injuries*, 2010, 716-719.
- [8] Petzschner F H, Ponce I P, Blaimer M, et al. Fast MR parameter mapping using k-t principal component analysis [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2011, 66: 706-716.
- [9] Vaswani N, Lu W. Modified-CS: modifying compressive sensing for problems with partially known support [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(9): 4595-4607.
- [10] Wang Y, Yin W. Sparse signal reconstruction via iterative support detection [J]. *Siam Journal on Imaging Sciences*, 2010, 3(3): 462-491.
- [11] Liang D, DiBella E V R, Chen R R, et al. k-t ISD: dynamic cardiac MR imaging using compressed sensing with iterative support detection [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2012, 68(1): 41-53.
- [12] Zhang N, Song G H, Liao W Q, et al. Accelerating dynamic contrast-enhanced MRI using K-T ISD [C] // 20th ISMRM Annual Meeting, 2012.
- [13] Yuan J, Liang D, Zhao F, et al. k-t ISD compressed sensing reconstruction for T1ρ mapping: A study in rat brains at 3T [C] // 20th ISMRM Annual Meeting, 2012.