

G-009

圧縮センシングのMRI マルチスライス撮像応用に関する検討
Study on Compressed Sensing of MR Multi-slice Imaging

原田 弘章[†] 伊藤 聡志[†] 山田 芳文[‡]Hiroaki HARADA[†] Satoshi ITO[†] and Yoshifumi YAMADA[‡]

1. はじめに

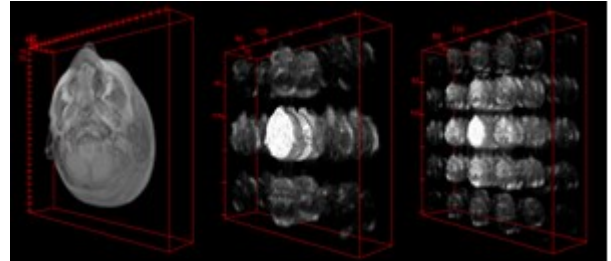
磁気共鳴映像法(MRI)の課題として撮像時間の短縮が挙げられる。近年、サンプリング定理を満たさない少数の信号データから画像再生を目指す圧縮センシング(Compressed Sensing)[1]の研究が進められている。これまで2次元撮像に対して圧縮センシング応用した場合に良質な画像を再構成できることを報告してきた[2]。本研究では圧縮センシングを臨床で使用されることの多い2次元マルチスライス撮像に応用する場合の検討を行った。特に再構成に使用するスライス数、3次元の画像データにスパース性を導入する関数、および信号量と再生像品質の関係について検討を行った。

2. 圧縮センシングの原理

圧縮センシングは、観測対象にスパース性が存在する前提のもとサンプリング定理で求められるデータ数よりも少量の観測データから信号を復元する手法である。 ρ を系列長 N のベクトル、 \mathbf{s} を系列長 M のベクトルからなる観測データ、 Φ を $M \times N$ の観測行列とする。 $\mathbf{s} = \Phi \rho$ の関係式から ρ を復元しようとするとき、 $M < N$ 場合であると、解は一意的に定まらない。しかし、 ρ の要素にゼロを多く含んでいることが予めわかっているときには ρ を復元することができる。MR画像は一般に ρ の要素にゼロを多く含んではいないが、適切な基底を持つ変換関数を施した場合に、信号のエネルギーがゼロに近い領域とそうでない領域とに明瞭に分かれる場合には近似的に圧縮センシングの手法を適用することができる。観測信号には雑音が含まれていることを考慮し、いま、スパース性を導入する関数を Ψ とすると、 $\tilde{\rho} = \Psi \rho$ として、式(1)の拘束条件付き最適化問題を解く。

$$\tilde{\rho} = \arg \min \|\tilde{\rho}\|_1 \quad \text{subj. to} \quad \|\mathbf{s} - (\Phi \Psi^T) \tilde{\rho}\|_2 < \varepsilon \quad (1)$$

式(1)から $\tilde{\rho}$ を求める方法には、いくつかあるが、本研究では比較的計算コストが少ない射影勾配法を使用することにした。計算コストが大きいベクトル計算の代わりに高速フーリエ変換を使用する場合は、式(2)、(3)に示す閾値処理と射影を反復的に行う方法になる。



(a) 入力画像 (b) $D_{xy}=3, D_z=3$ (c) $D_{xy}=5, D_z=5$
Fig.1 eFREBAS 変換例(D_{xy} と D_z はスケール係数)

またスパース性導入関数として Fig.1 に示すような任意のスケールに設定できる eFREBAS 変換[3]を使用した。

$$\tilde{\rho}^{(i)} = \Psi \rho^{(i)} \quad (2)$$

$$\tilde{\rho}^{(i)} = \tilde{\rho}^{(i)} + \frac{1}{\gamma} \Psi F_u^T (\mathbf{s} - F_u \rho^{(i)}) \quad (3)$$

$$\tilde{\rho}^{(i)} = \begin{cases} \tilde{\rho}^{(i)} & |\tilde{\rho}^{(i)}| \geq \tau^{(i)} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

3. 圧縮センシングのマルチスライス応用

MRIではスライスと呼ばれる面内の信号計測の後にスピンの緩和を待つ時間が必要である。マルチスライス撮像は緩和を待つ時間に別のスライスの信号計測を行うので、3次元ボリュームの撮像に要する時間を実質的に短縮することができる。圧縮センシングをMRIに応用する場合に、信号の計測時間に比例する位相エンコード方向の信号取得数を間引く方法が取られている。

圧縮センシングを2次元マルチスライス撮像に応用する場合にスライス面内の信号だけに注目すれば位相エンコード方向に信号を間引きながら収集する点において2次元撮像と変わらない。しかし、連続するスライス像を3次元像とみなし、3次元空間でスパース性を与えることができれば、2次元空間でスパース性を与える場合に比べ画質の向上が期待できる。これを実現するには、Fig.2に示すようにスライス方向(z方向)の収集軌道選択にランダム性を与えればよい。すなわち、各スライスには同量の信号を与えるが、異なる収集軌道を選択する。このとき、スライス像からなる3次元像に3次元空間でスパース性を与えると、再生誤

[†] 宇都宮大学 大学院工学研究科
情報システム科学専攻
[‡] 宇都宮大学名誉教授

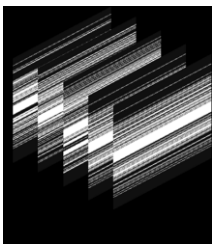


Fig.2 信号収集軌道

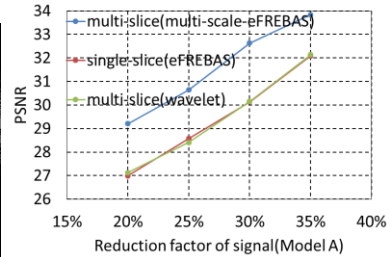


Fig.3 信号量別の画質比較

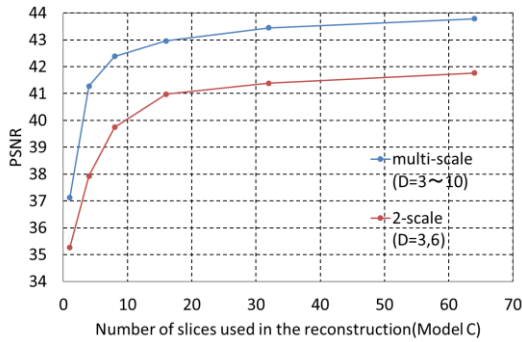


Fig.4 再構成枚数と再生像品質の関係

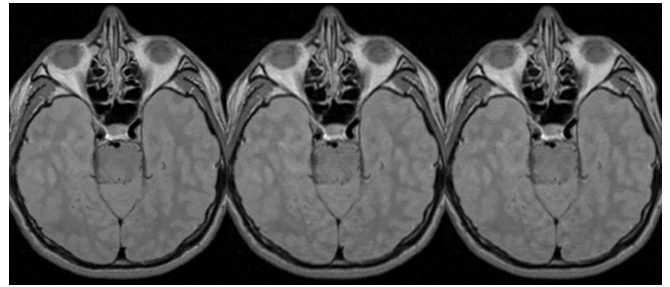
差は位相が揃うこと無く、雑音のようにランダムに分布する。本研究では、信号量、使用するスライス数と画質の関連について検討を行った。また、本研究でスパース性導入関数として使用した eFREBAS 変換のスケール係数を多重に使用する方法[3]による画質の改善についても検討を行った。

4. 画像再生精度評価

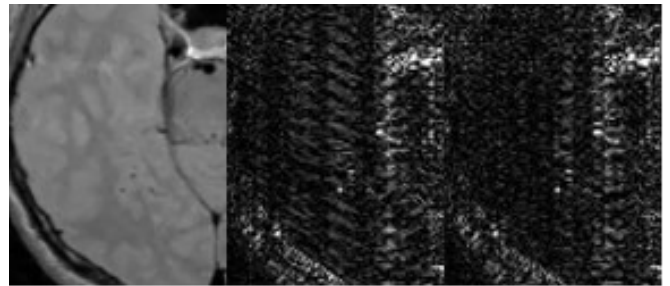
承諾を得られた健常ボランティアに対し、東芝 1.5T 製 MRI を使用して得られたマルチスライス像を用いて画像再生実験を行った。画像サイズはスライス面が 256×256 マトリクスであり、スライス枚数を 1~64 枚と変えて再生を行った。再生像の評価では、フルデータ信号を利用した再構成像と圧縮センシング再生像との差を再生誤差の平均二乗誤差(MSE)として式(5)より PSNR を求め、これを画質評価に使用した。

$$\text{PSNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\max \|\rho\|_1}{\text{MSE}} \right) \quad (5)$$

Fig.3 に eFREBAS 変換の xy 面内の D 値 (D_{xy}) として 6,9 の 2 通りを使用した 2 次元再構成と Wavelet 変換および multi-scale eFREBAS 変換を用いた PSNR 評価結果を示す。multi-scale eFREBAS 変換では、閾値を変化させる度に D_{xy} を変え、本研究では 3~10 まで 1 刻みで変化させた。Fig.3 より全ての信号量においてマルチスライス再構成の方が、2 次元再構成より良好な数値を示していることが分かる。Fig.4 に D_{xy} 値 6,9 を使用した場合と multi-scale eFREBAS 変換のマルチスライス



(a)フルデータ再生像 (b)2次元再構成 (c)マルチスライス



(d)aの拡大画像 (e)bの誤差画像 (f)cの誤差画像

Fig.5 信号量 30%での再構成画像

再構成枚数を変えた場合の PSNR を示す。multi-scale 法を利用すると顕著に PSNR が大きくなっていることがわかる。Fig.5 に信号データ量を 30%とした再生像の一部を示す。(a)はフルデータ再構成像、(b)は 2 次元再生像、(c)は multi-scale eFREBAS 変換を用いた再構成像である。(e)、(f)より マルチスライス再構成の方が、誤差が低減されていることが確認できる。

5. まとめ

MRI のマルチスライス撮像に圧縮センシングを応用したマルチスライス再構成では、各スライスの収集軌道にランダム性を与えることによって 3 次元空間でスパース性を与えることができる。これにより再生像の品質はスライス像単独で 2 次元再構成を行う場合に比べ改善される可能性が示された。また、スパース性導入関数に multi-scale eFREBAS 変換を利用することにより、顕著に再生像の PSNR を改善できることが示された。

参考文献

- [1] M Lustig, et al., "Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging," Magn Reson Med, vol.58, no.6, pp.1182-1195(2007)
- [2] S. Ito, et al., "Compressed sensing in Magnetic Resonance Imaging Using the Multi-step Fresnel domain Band Split Transformation," Magn Reson Med, vol.11, no.4, pp.243-252 (2012)
- [3] 伊藤聡志, 山田芳文, "拡張 FREBAS 変換を利用した雑音画像の多段階鮮鋭化," 信学論, vol. J93-D, no.6, pp.999-1008(2010).