

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560510

研究課題名(和文) 圧縮センシングと位相拡散フーリエ法によるMRIの高速撮像と再構成に関する研究

研究課題名(英文) Study on Faster Imaging and Reconstruction using Compressed Sensing and Phase-scrambling Fourier Imaging

研究代表者

伊藤 聡志 (Ito, Satoshi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80261816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮センシングのMRI応用において画像にスパース性を与える関数に我々が提案するFREBAS変換とeFREBAS変換を利用した．2次元，3次元像，マルチスライス像に圧縮センシングを応用し，極めて少数の信号データから良好な画像を再生できることが確認された．また，位相をもつ画像に対しては，eFREBAS変換の展開スケールを変えることにより位相歪に頑健になることが明らかにされた．圧縮センシングで問題となる再構成時間を短縮化するために，GPUを利用した高速化を図った．その結果，計算機のCPUを利用する場合に比べ，約9程度の高速化が達成された．

研究成果の概要(英文)：A multi-scale sparsifying transform based on the Fresnel transform (FREBAS) is adopted in order to improve the quality of CS images. The experimental results demonstrate that by increasing the sparsity of the image in the FREBAS transform domain, curved features in MR images can be faithfully reconstructed. It was also revealed that proposed method is robust to the phases on the images due to the susceptibility or blood flow.

In addition, we examine to accelerate the CS reconstruction by using the Graphics Processing Unit (GPU) as a general purpose use. Experimental results show that GPU dramatically accelerates CS reconstruction and single image reconstruction was executed in 1.3 s which suggests the speedups of 9-times.

研究分野：工学

キーワード：信号処理 圧縮センシング スパース MRI

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高齢化社会に加えて実年世代の成人病罹患率が上がり、生体内部の観察を可能とする画像診断装置の重要性が増している。なかでも磁気共鳴現象を利用した MRI は、X 線 CT のように被曝を伴わず、かつ X 線 CT では描出されにくい軟部組織を高コントラスト画像として映像化できる利点があるので今後さらに需要が増すものと予想される。

MRI の最大の課題は撮像時間の短縮である。X 線 CT は画像 1 枚の取得に要する信号収集時間は 0.5 秒以下である。それに対し、MRI では通常の撮像条件では数分を要し、患者への負担増、スループットの低下が問題となっている。

近年、圧縮センシングと呼ばれる新しい信号復元理論が注目を集めている。この圧縮センシングを MRI に応用し、少数の観測データから画像を再構成することができれば、それは信号収集時間の短縮に直結し、その効用は極めて大きいものがある。そのため、極めて多くの研究報告がなされ、国際会議ではセッションが新設されるに至っている。圧縮センシングを応用することにより MRI の撮像を高速化することが期待できる。

### 2. 研究の目的

磁気共鳴現象を利用した Magnetic Resonance Imaging(MRI)では、高磁界化が進み高分解能な画像が取得されるようになってきている。しかし、その一方で、撮像のための信号収集は依然として時間を要する問題がある。本研究は、圧縮センシングという新しい信号復元理論を組合せ、実質的な信号収集時間を減少させ、MRI 撮像の高速化により患者の負担軽減、スループットの改善による医療費負担の軽減などを目的とする。

### 3. 研究の方法

圧縮センシングは、観測信号の圧縮可能性の仮定のもとで、観測データをできるだけ少なくし、その少数データから観測信号を復元する手法である [1,2]。ρ を系列長 N のベクトル、s を系列長 M のベクトルからなる観測データ、Φ を M × N の観測行列とする。s = Φρ 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、解は一意に定まらない。しかしながら、ρ のベクトルを構成する成分のうち、そ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。ρ のベクトルにゼロを含まない場合でも、適切な基底を持つ変換関数を施した場合に、その表現係数の多くが 0 であるとき (スパース性) には、圧縮センシングを適用することができる。いま、変換関数を Ψ とするとき、 $\tilde{\rho} = \Psi \rho$  として、式(1)から  $\tilde{\rho}$  を求める問題に帰着する。

$$s = \Phi(\Psi^{-1}\tilde{\rho}) = (\Phi\Psi^{-1})\tilde{\rho} \quad (1)$$

観測行列 Φ と観測ベクトル s から未知ベクトル  $\tilde{\rho}$  を求める方法として、信号に対する拘

束条件のもとで式(2)の 1-ノルム最適化問題を解くことにより、高い確率で原信号を復元することができる。

$$\tilde{\rho} = \arg \min \|\tilde{\rho}\|_1 \text{ subj. to } s = (\Phi\Psi^{-1})\tilde{\rho} \quad (2)$$

MR 画像は一般にスパース性を示さない。また、何らかの変換関数等を導入した場合でもスパース性を示すことは稀であるが、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スパース性を示すものとして圧縮センシングの手法を適用することができる。また、観測信号には雑音が含まれるので、雑音量に關係する定数 ε を使用して式(3)の拘束条件付き最適化問題を解く。

$$\tilde{\rho} = \arg \min \|\tilde{\rho}\|_1$$

$$\text{subj. to } \|s - (\Phi\Psi^{-1})\tilde{\rho}\|_2 < \varepsilon \quad (3)$$

式(3)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(5)、(6)に示す閾値処理と射影を反復的に行う方法になる。

$$\tilde{\rho}^{(i)} = \Psi \rho^{(i)} \quad (4)$$

$$\tilde{\rho}^{(i)} = \tilde{\rho}^{(i)} + \frac{1}{\gamma} \Psi F_u^T (s - F_u \rho^{(i)}) \quad (5)$$

$$\tilde{\rho}^{(i+1)} = \begin{cases} \tilde{\rho}^{(i)} & |\tilde{\rho}^{(i)}| \geq \tau^{(i)} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

ここで i は反復回数を示すインデックス、τ は反復 i 回時の閾値、γ は画像の更新に関わる係数、F<sub>u</sub> はフーリエ変換後に間引きを行う関数であり、F<sub>u</sub><sup>T</sup> は、間引きを行った軌道にゼロデータを充填して逆フーリエ変換する関数である。関数 Ψ には、我々が提案する FREBAS 変換を利用した。スパース性を導入する関数 Ψ には、いくつかの方法が有り、ウェーブレット変換や空間差分などが用いられることが多い。二進分割型ウェーブレット変換は、画像の成分分解が高周波成分と低周波成分の二進分割であるため特定の斜め方向の成分検出性能が低下すること、ならびにシフト不変性の欠如などの問題点が指摘されている [3]。一方、我々が提案する FREBAS 変換 [4] は画像が周波数空間の分解と対応しながら等しいスケールをもった複数の画像に分解され、上下、左右方向だけでなく、斜め方向にも多くの成分検出が可能である。また、シフト不変性を備えているので、二次元の圧縮センシング応用においてウェーブレット変換よりも良質な画像を再生している。以上の理由から、本研究では FREBAS 変換を三次元に拡張した三次元 FREBAS 変換を Ψ として使用した。

式(1)の ΦΨ<sup>-1</sup> に相当する観測行列は、行列の非零要素がランダムに存在することが求められる。MRI で簡便にこれを実現する方法と

して信号空間内で観測する信号収集軌道をランダムに設定する方法がある．臨床用 MRI で最もよく使用されるカルテシアン座標系の信号収集軌道では，信号の間引きは，サンプリング間隔が長く撮像時間に比例する位相エンコード方向に行われる．二次元撮像の場合は，信号の収集軌道をランダムに取ることができるのは位相エンコード方向の一次元のみであるが，三次元撮像の場合には位相エンコード方向が一次元増えて二次元となるので，ランダムに設定できる信号収集軌道は二次元に増える．そのため圧縮率の向上，すなわち，同量の信号収集率であるときに二次元撮像に比べてより良質な画像の再生が期待できる．

#### 4. 研究成果

再構成実験では，被験者の同意を得て撮像された  $256 \times 256$  画素の画像 48 枚と 50 枚からなる二種類のマルチスライス像を利用した．信号収集は臨床で最もよく使用されるカルテシアン座標系を採用した．圧縮センシングを想定した信号は，フルデータ信号に対し計算機内でランダムに間引き処理を行うことによりプログラム内で作成した．

多くの被写体において信号空間の低周波域に信号エネルギーが集中する性質がある．そのため信号の間引きを行う位相エンコード方向において低周波成分は間引き率を小さくし，高周波成分は間引き率を大きくする軌道選択法が多く採用されている．Fig.1 に収集軌道を示す．白線で示されている部分の信号を収集した．(a) は参考のために示す二次元撮像の場合の信号収集軌道であり，(b) は三次元撮像のための収集軌道である．時間読み取り方向の  $k_y$  方向には間引き処理を行わず，位相エンコード方向の  $k_x$  と  $k_z$  方向には信号収集密度が  $\cos$  関数に比例するように信号を収集する軌道となっている．ただし，信号エネルギーが特に集中する信号空間の中央部は，間引きを行わずに連続的に信号収集を行い，軌道(a)の場合は 20 行，軌道(b)の場合は  $k_x$  方向， $k_z$  方向それぞれ  $20 \times 8$  の信号データは密に計測を行う設定とした．再生像の品質評価は，フルデータ信号から再構成像した画像と圧縮センシングにより得られた像とを比較し，その差である再生誤差を雑音とみなし，信号対雑音比(PSNR: Peak signal-to-noise ratio)により画質を評価した．

FREBAS 変換のスケーリング係数は， $x$ - $y$  方向とそれと直交する  $z$  方向のスケール係数をそれぞれ， $D_{xy}$  と  $D_z$  とするとき，予備的な検討から ( $D_{xy}$ ,  $D_z$ ) として (6, 4) と (9, 4) の二通りを使用したときに良好な結果が得られた．よって，本研究ではこの二組の組み合わせを使用し，再生像の品質向上を図った．また，比較のために  $x$ - $y$  断面の二次元画像に対して二次元撮像を想定した場合の圧縮センシング再構成を行った．このとき，FREBAS 変換のスケーリング係数には，6 と 9 を使用した．

反復計算において，FREBAS 展開したときに高周波成分となる最外周の展開像は，再生誤差が支配的となる．この性質を利用し，閾値の初期値  $\tau^{(0)}$  は，最外周となる展開像の振幅標準偏差の平均を  $\sigma_{\text{error}}$  とするときに， $\tau^{(0)} = 3.5 \sigma_{\text{error}}$  とした．各閾値にて反復計算を行い，更新前後の画像の平均二乗誤差を  $\epsilon_{\text{RMS}}$  とするときに， $(\epsilon_{\text{RMS}} / \max[\rho^{(i)}]) < 10^{-3}$  となった場合に閾値を式により低下させた．

評価に用いた GPU を搭載するコンピュータと使用した GPU である NVIDIA Tesla C2075 の仕様をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す．計算機再構成では Visual C 環境によりコーディングを行った．前論文で示したように計算機のみを使用して再構成を行う場合と GPU を利用する場合とで再生像に含まれる誤差に有意な差は生じなかった．

信号の収集率を 20% から 35% まで変えて圧縮センシングを用いた再構成を行った．ここで再構成の計算は GPU を主として行った．再生像の PSNR を二次元撮像へ応用した場合と比較して Fig. 2 に示す．ここで求めた PSNR は二種類の画像モデルのそれぞれについてスライス像毎に PSNR を求め，その平均値を Fig.2 の値とした．二次元撮像の場合は，各スライス像に二次元撮像の場合の圧縮センシング再構成を適用し，その PSNR 平均値とした．また，Fig. 3 には信号収集率を 20% とした場合の再生像の一断面を示す．(a) は信号空間の全データを使用した再生像であり，(b) と (c) はそれぞれ三次元撮像と二次元撮像

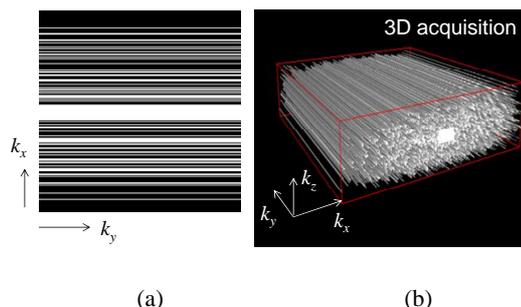


Fig.1 圧縮センシングを適用する場合の信号収集軌; (a) 二次元撮像, (b) 三次元撮像

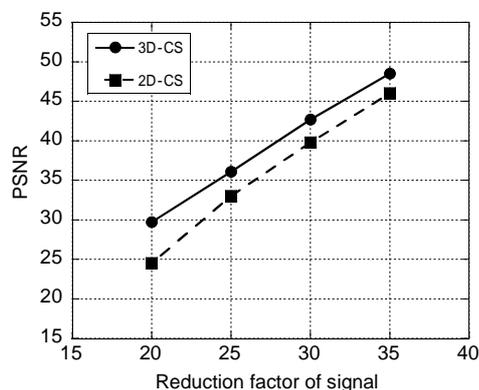


Fig. 2 2次元CSと3次元CSによるPSNR比較

**Table 1** GPU コンピュータの仕様

CPU	Intel Core i7 960 3.20GHz
RAM	12GB DDR
GPU	Tesla C2075
Software	CUDA SDK3.0 , CUDA Toolkit3.0

**Table 2** GPU の仕様

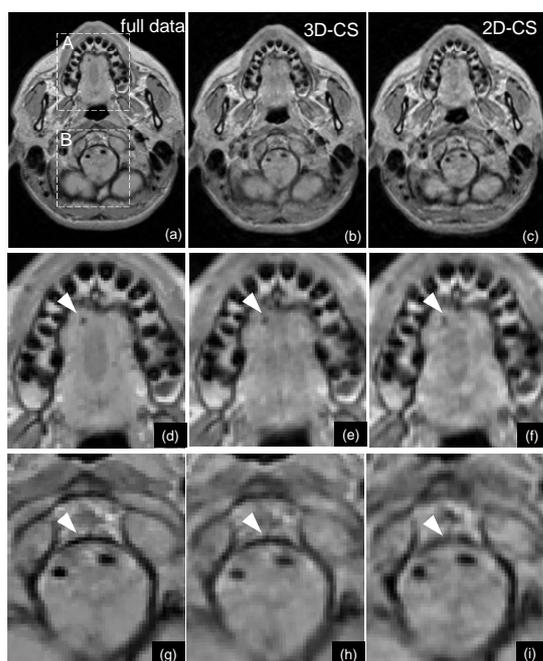
GPU type	NVIDIA Tesla C2075
Device memory	6.0GB
Core clock	1.15 GHz
Memory clock	1.5GHz
Shader processors	448
Memory bandwidth	148 GB/s
Bus width	384 bit
GFLOPS	1.03

**Table 3** GPU 計算による高速化

Data matrix	256x256x64
CPU time(s)	807.1
GPU time(s)	53.2
Speedup factor	15.2

に対し圧縮センシングを適用した場合の再生像である。破線の枠で囲んだ領域 A と B の拡大図を(a)~(c) に対応させて、(d)~(f) と(g)~(i)にそれぞれ示す。

圧縮センシングの再構成を計算機の CPU のみを使用する条件と、GPU を使用する条件とで比較を行った。Table 3 に結果を示す。なお、再構成に要する反復回数は 30 回であった。Table 3 の結果より、GPU を適用することによって、CPU では 807.1 秒を要した計算が、GPU の利用により 53.2 秒に短縮され、約 15 倍という高速化が達成された。



**Fig. 3** 信号収集量が 20% の場合の再生像比較; (a) 全データ収集画像, (b) 3 次元 CS, (c) 2 次元 CS,

(d)-(f) A 部拡大像, (g)-(i) B 部拡大像.

<引用文献>

- [1] Donoho DL : Compressed sensing, IEEE Trans. Inform. Theory, **52**,:1289-1306, 2006
- [2] Candès, EJ, Wakin, MB: An Introduction To Compressive Sampling, IEEE Signal Processing Magazine, **21**, 2008
- [3] Mun S, Fowler JE: Block Compressed Sensing of Images using Directional Transforms. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.3021-3024, Cairo, Egypt, 2009
- [4] Ito S, Yamada Y : Multiresolution Image analysis using dual Fresnel transform Pairs and Application to Medical Image Denoising, IEEE International Conference on Image Processing 2003, Barcelona, Spain, Map8.7, 2003

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 16 件)

伊藤聡志, 原田弘章, 山田芳文, 圧縮センシングの MRI マルチスライス撮像における画像再構成条件と再生像品質の関連, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 査読有 vol.32, No.2, pp.123-131, 2014  
DOI:<http://dx.doi.org/10.11409/mit.32.123>

伊藤聡志, 斉藤文彦, 荒井博俊, 山田芳文, GPU を用いた三次元 MRI 圧縮センシング再構成の高速化, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 査読無, vol.31, No.3, pp.167-175, 2013  
DOI:<http://dx.doi.org/10.11409/mit.31.167>

伊藤聡志, 特集 / GPU の基礎と医用画像への応用, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 査読無, vol.31, No.3, pp.145-146, 2013  
DOI:<http://dx.doi.org/10.11409/mit.31.145>

伊藤聡志, 中村一喜, 斉藤文彦, 山田芳文, MR 画像の位相ひずみに頑健な圧縮センシング, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, vol. J96-D, No.4, pp.803-812, 2013  
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=D&lang=J&vol=J96-D&num=4&abst=>

S. Ito, S. Yasaka, Y. Yamada, MR Image Reconstruction of a Regularly Undersampled Signal using Quadratic Phase Scrambling, IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) 2015, 査読有, Quebec city, CA, 2015 (Accepted)  
<http://www.icip2015.org/>

S. Ito, M. Shibuya, K. Ito, Y. Yamada, Simultaneous Magnitude and Phase Regularization in MR Compressed Sensing using Multi-frame FREBAS Transform, International Society of Magnetic Resonance in Medicine 23th Scientific Meeting, 査読有, Proceedings on USB, Toronto, CA, 1839, 2015(Accepted)  
<http://ismrm.org/15/>

S. Ito, S. Yasaka, Y. Yamada, Image Reconstruction of Under-sampled Signal at Equal Interval using Quadratic Phase Scrambling, International Society of Magnetic Resonance in Medicine 23th Scientific Meeting, 査読有, Proceedings on USB, Toronto, CA, 1585, 2015(Accepted)  
<http://ismrm.org/15/>

S. Ito, H. Arai, Y. Yamada, Compressed Sensing in Magnetic Resonance Imaging Using the Multi-step Fresnel Domain Band Split Transformation, Magnetic Resonance in Medical Sciences, 査読有, vol.11, no.4, pp.243-252, 2012  
<http://www.kopas.co.jp/fmi/iwp/cgi?-db=dbjsmrm&-loadframes>

小久保潤, 伊藤聡志, 山田芳文, 圧縮センシングを導入したMR高速撮像におけるGPU利用による再構成の高速化, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 査読有 vol.30, No.2, pp.115-122, 2012  
DOI:<http://dx.doi.org/10.11409/mit.30.115>

S. Ito, K. Ito, M. Shibuya, Y. Yamada, Compressed Sensing MRI using Higher Order Multi-scale FREBAS for Sparsifying Transform Function, SPIE Medical Imaging 2015, , 査読有 9413-16, Orlando, USA, 2015  
<http://spie.org/x12166.xml>

S. Ito, Y. Yamada, Compressed Sensing for Magnetic Resonance Images with Phase Variations, IEEE International Conference on Audio, Speech, and

Signal Processing (ICASSP), 査読有 BISP-P7.1, pp.6648-6651, Florence, Italy, 2014  
<http://www.icassp2014.org/home.html>

S. Ito, Compressed Sensing for Magnetic Resonance Images with Phase Variation, IEEE International Symposium on Biomedical Imaging, 査読有, TuB06.10, Beijing, China, 2014  
<http://www.biomedicalimaging.org/2014/>

S. Ito, Y. Yamada, Compressed Sensing for Magnetic Resonance Imaging using Multi-scale FREBAS Transform, 2014 International Workshop on Advantage Image Technology, 査読有, pp.201-205, Proceedings on CD-ROM, Bangkok, Thailand, 2014  
<http://www.iwait2014.org/>

S. Ito, Y. Yamada, Reduction of Remained Artifacts in Alias-free Reconstruction of MR Images, International Society of Magnetic Resonance in Medicine 21th Scientific Meeting, 査読有, Proceedings on USB, Saltlake city, USA, 2675, 2013  
<http://ismrm.org/13/>

S. Ito, K. Nakamura, Y. Yamada, An Efficient Compressed Sensing Reconstruction Robust to Phase Variation on MR Images, International Society of Magnetic Resonance in Medicine 21th Scientific Meeting, 査読有, Proceedings on USB, Saltlake city, USA, 2604, 2013  
<http://ismrm.org/13/>

S. Ito, H. Arai, Y. Yamada, Compressed Sensing with Super-resolution in Magnetic Resonance using Quadratic Phase Modulation, APSIPA annual summit & conference 2012, , 査読有, Proceedings on USB, Hollywood, USA, PS.4-BioSPS.3, 2012  
<http://www.apsipa2012.org/>

[学会発表](計28件)

伊東賢治, 伊藤聡志, 山田芳文, マルチスケール eFREBAS 変換を利用したMR画像の圧縮センシング, 2014年映像情報メディア学会冬季大会 2-1(2014.12.17), 東京理科大

伊藤聡志, 小野寺有太, 山田芳文, GPGPUを利用した圧縮センシングのMRマルチスライス像再構成の高速化,

第 42 回日本磁気共鳴医学会大会,  
P-2-116, p.370(2014.9.19),京都グラン  
ビアホテル

福地健介, 伊藤聡志, 山田芳文, 圧縮  
センシング再構成法に関する検討, 第42回  
日本磁気共鳴医学会大会講演抄録集,  
O-5-234, p.264(2014.9.19), 京都グラン  
ビアホテル

小野寺有太, 伊藤聡志, 山田芳文, 圧縮  
センシングの MR マルチスライス撮像応  
用における GPGPU を利用した再構成の  
高速化(1), 第 33 回日本医用画像工学会  
大会, PP6(2014.7.25), 東京慈恵会医大

伊東賢治, 伊藤聡志, 山田芳文,  
Multi-scale eFREBAS 変換を利用した  
MR 圧縮センシングの検討, 第33回日本  
医用画像工学会大会, OP1-10(2014.7.25),  
東京慈恵会医大

伊藤聡志, 中村一喜, 山田芳文, ハーフ・  
フーリエ法と位相歪みに頑健な MR 圧縮  
センシングとの比較, 第41回日本磁気共  
鳴医学会大会, P-2-161,  
p.413(2013.9.20), アスティとくしま

原田弘章, 伊藤聡志, 山田芳文, MRI の  
二次元と三次元撮像に対する圧縮センシ  
ング適用性評価, 第32回日本医用画像工  
学会大会, OP8-7 (2013.8.3), 日本科学未  
来館

他 21 件  
〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.ced.is.utsunomiya-u.ac.jp/~i  
tohst/NMRyi/index.html](http://www.ced.is.utsunomiya-u.ac.jp/~i<br/>tohst/NMRyi/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 聡志(ITO SATOSHI)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80261816

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし