

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560416
 研究課題名（和文） MRIにおける高分解能アンチエイリアス画像再構成法に関する研究
 研究課題名（英文） Study on High-resolution Anti-alias MR Imaging
 研究代表者
 伊藤 聡志 (ITO SATOSHI)
 宇都宮大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：80261816

研究成果の概要：

汎用 MRI の撮像法に改変を加えた方法の信号では、収集される信号に対し画像再構成、再構成画像の実数値化、信号合成処理、収集信号の置換処理の順に実行する反復処理を適用すると、雑音の有無に関わらず NMR エコー信号は収集範囲を超えて外挿することができる。分解能の改善は周辺部において最大2倍に達することが示された。また、信号分布が画像を意味する空間にある特徴を利用し、単一信号からパラレルイメージングを実現する方法の原理確認を行い有効性を検証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	1,800,000	540,000	2,340,000
平成20年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：信号処理，サンプリング定理，再構成，MRI，画像

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 のように被爆を伴わないので、今後さらに需要が増すものと予想される。

この MRI では、撮像法に関しては描出化の対象により様々なパルスシーケンスがとられ、近年は神経束までが描出されるまでにな

っている。しかし、一方で画像を再構成する方法は実用的にはフーリエ変換再構成が使用されるのみである。このフーリエ変換再構成は高速かつ等方的な分解能が得られる優れた方法であるが、画像再生において必ずしも柔軟性があるとはいえない。

我々は、MRI の画像再構成問題においてフーリエ変換による画像再生に加え、フレネル変換処理による画像処理の研究を長く行っている。このフレネル変換による画像再生では、アルゴリズムの異なる2通りの再生法が

可能であるが、一方の方法は信号空間と同じ空間に画像を再生し、もう一方の方法は信号のフーリエ変換空間に再生する。最近になって、この多様な再生法が興味深い多くの特徴を含んでいることを見出し実用的な応用化を計っている。例えば、2通りのフレネル変換をそれぞれ順方向と逆方向に連続的に使用すると、一種の多重解像度解析の様相となりフィルタバンクを構成する。この画像変換処理 (FREBAS と称している) を利用した画像雑音処理を利用し信号劣化が少ない雑音処理法を実現している。

本研究では、MRI で汎用となっているフーリエ変換映像法に新たなパルスを追加する撮像法 (位相拡散フーリエ法) を使用した新しい画像再構成について研究を行う。この位相拡散フーリエ法の信号は通常のフーリエ変換再構成法だけでなく、我々がこれまでいくつかの特長を明らかにしてきたフレネル変換を利用した画像処理が可能となる。位相拡散フーリエ法の信号は一種のスペクトル拡散信号となるので、通常のフーリエ変換型の信号に比べて遥かに超解像の効果が大きく高分解能画像の再生可能性がある。また、2通りのフレネル変換を利用した画像スケールアップ機能を応用すると撮像した画像の折り返しアーティファクト問題の解消など柔軟な画像再構成となる可能性が極めて高い。

2. 研究の目的

本研究の目的を以下に挙げる。

- (1) 超解像を利用した高分解能画像の再生
 - ① 理論的に説明を行う。良好な超解像が可能な背景を理論的に説明する。また、収束の可否について論ずる。
 - ② 数値シミュレーションを実施し、分解能の改善度を数値化する。位相拡散パラメータなどの撮像パラメータとの関連を明らかにする。
 - ③ 撮像実験を行い、雑音を重ねた信号からでも実現可能であることを検証する。
- (2) 高速イメージングへの応用可能性の検討
 - ① 折り返しが生じている信号から分解能の損失を抑えながら折り返し解消像を再生できれば、一種の高速撮像法となる。この応用について理論的、実験的検証を行う。
 - ② 2種類の折り返し像から1枚の折り返しの生じない画像を再生するパラレルイメージングに応用し、画像合成の誤差を低減した方法の検討を行う。

3. 研究の方法

- (1) 超解像を利用した高分解能画像の再生

位相拡散フーリエ法 (Phase Scrambling Fourier Transform imaging: 以後 PSFT 法と略称する) は、フーリエ変換映像法の位相

エンコード方向勾配磁界に同期して2次関数状磁界を使用する方法である。読み出し用勾配磁界 g_x の反転時刻からの時間を t とし、 t_{xr} を g_x の反転時間、 t_x を $t - t_{xr}$ 、として、 t_x の中心をエコー信号の中心に設定する。緩和による減衰を無視するとエコー信号式は式(1)で与えられる。

$$v(\gamma g_x t_x, \gamma g_y t_y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \rho(x, y) e^{-j\gamma b \tau (x^2 + y^2)} \right\} e^{-j(\gamma g_x t_x x + \gamma g_y t_y y)} dx dy \quad (1)$$

ここで $\rho(x, y)$ は xy 平面のスピンドensity分布であり、 b は2次関数状磁界の係数、 τ はその印加時間、 g_x と g_y はそれぞれ x 方向と y 方向の線形勾配磁界の係数である。また、 t_y を g_y の印加時間、 γ を核磁気回転比とした。

PSFT 信号からの画像再構成は、式(1)の信号を逆フーリエ変換した後に、与えた2次の位相変調効果の逆位相を有する関数を乗じればよい。 $k_x = \gamma g_x t_x$ 、 $k_y = \gamma g_y t_y$ とすると次式で与えられる。

$$\rho(x, y) = e^{j\gamma b \tau (x^2 + y^2)} F[v(k_x, k_y)] \quad (2)$$

拡大したことを意味する (Fig.1(e))。そして、帯域拡大によって分解能は $(k_w + 2k_0)/2$ だけ改善する。 $k_0 = k_w/2$ とした場合は、いわゆるハーフ・フーリエ法に相当する。

Fig.1 に Gerchberg の超解像処理を応用した反復的な帯域拡大処理手順を示す。

(Step 1) (a) の PSFT 信号 (N 点) の外側にゼロデータを補充して $2N$ 点とし、逆フーリエ変換による再構成を行う。[(a) \rightarrow (b)]

(Step 2) (b) の再生像に対し実験的に与えた2次の位相変調の逆位相項 $\exp[j\gamma b \tau x^2]$ を乗じ

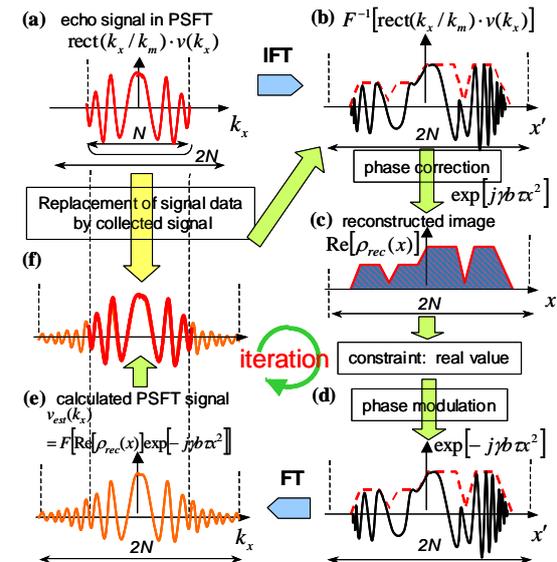


Fig.1 Algorithm of frequency band expansion and improvement of spatial resolution of reconstructed image using PSFT signal.

る. [(b)→(c)]

(Step 3) 信号の実数部を取得し, 再び位相変調 $\exp[-j\gamma b\tau x^2]$ を与え, フーリエ変換処理を行う. [(c)→(d)→(e)]

(Step 4) 得られた信号のうち, 収集した帯域幅については真値とわかっているから, 中央の N 点は(a)の収集信号で置換する. [(e)→(f)]

(Step 5) (f)の信号を逆フーリエ変換再構成を行う. [(f)→(b)]

以降は, (Step2)から(step 5)の処理を繰り返すことにより, 得られる画像の分解能は改善して行く.

(2) 高速イメージングへの応用

式(1)において位相項をまとめて式(3)のように変数変換を行うと, 式(4)が得られる.

$$x' = -\frac{k_x}{2\gamma b\tau}, \quad y' = \frac{k_y}{2\gamma b\tau} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & v(x', y') e^{-j\gamma b\tau(x'^2 + y'^2)} \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y) e^{-j\gamma\tau\{(x'-x)^2 + (y'-y)^2\}} dx dy \quad (4) \\ &= v_{FR}(x', y') \end{aligned}$$

式(4)の右辺は光や音波などの回折現象で知られるフレネル変換信号と同型である. このように PSFT 信号に対し数値的に二次の位相変調を与えると, フレネル変換型の信号へ変形させることができる. この信号は画像がフレネル回折分布と信号強度が同一となっている特徴がある.

PSFT 法の信号は画像が回折現象によりぼけた分布と同形となっているので, PSFT 信号空間に重みを乗じることは近似的に被写体空間である画像全体に重みを乗じることと同等な効果がある.

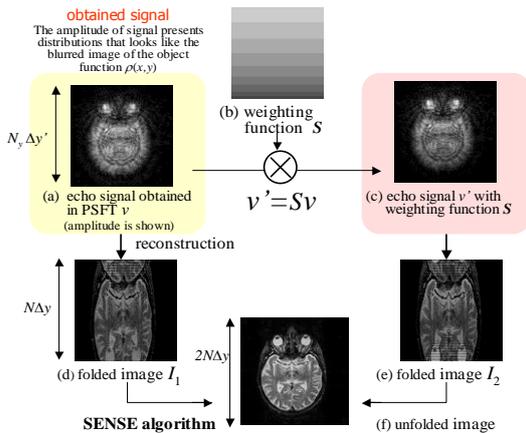


Fig. 2 Schematic of parallel imaging using a single signal; dummy sensitivity map(b) is multiplied to PSFT signal (a) to obtain a PSFT signal having sensitivity close to S.

サンプリング定理を満たさない信号から折り返しを含まない再生画像を得るアルゴリズムを Fig.2 に示す.

1. PSFT の信号 v (a) に感度分布 S (b) を乗算し, PSFT の信号 v' (c) を得る.
2. PSFT の信号 v (a) からフーリエ変換により折り返し像ありの再構成画像 I_1 (d) を得る.
3. PSFT の信号 v' (c) からフーリエ変換により折り返し像ありの再構成画像 I_2 (e) を得る.
4. SENSE 法のアルゴリズムにより折り返しを取り除いた再構成画像(f)を得る.

4. 研究成果

(1) 超解像を利用した高分解能画像の再生

提案法の有効性と分解能の改善程度を調べるために分解能評価用の数値モデルを使用したシミュレーションを実施した. 信号データ数 N は 128×128 , 画像データ数は 256×256 とした. フーリエ変換再構成像の分解能 Δx は 0.2 cm , 撮像パラメータ $\gamma b\tau$ を 0.49 rad/cm^2 とした結果を Fig.3 に示す. (a) は通常のフーリエ変換映像法の信号からの再生像, (b) は PSFT 信号からの再生像, (c) は, PSFT 法の信号に帯域拡大処理を適用した信号からの再生像である. 各図の上段には再生像の中央部を, 下段には(a)図の A-A 線上のプロファイルを示す. また, Fig.4 には, 本法により信号帯域が拡大した信号を示す. (a) は提案法処理前, (b) は提案法処理後の信号である. ただし, 低振幅部を表示した図となっている.

撮像パラメータ $\gamma b\tau$ と分解能の改善程度との関係を調べた結果を Fig.5 に示す. 横軸は空間座標に対応する再生像のデータインデックスであり, 画像空間の中心を 0 点としている. $\gamma b\tau_{\max}$ は m を視野端の値として $N/2$ を与えると 0.61 rad/cm^2 となる. この値を基準として $\gamma b\tau$ 値を $0.37, 0.49, 0.61, 0.73 \text{ rad/cm}^2$ を与えて評価を行った.

Fig.3 の一次元プロファイルを見ると, (c) の提案法による再生像は(a)の通常のフーリエ変換再構成像に比べて小孔部の谷の振幅が低下し, 分解能が改善されていることがわかる. これは, Fig.4 に示すように反復処理により, 打ち切りによって失われた信号が一部復元され, 等価的に帯域幅が拡大しているためである. 小孔の振幅は, 周辺部ほど小さくなっていることから, 分解能の改善が空間では一様ではなく, 周辺部ほど高分解能になることが示されている. 次に反復処理前後で比較すると, (b)の PSFT 信号からの逆フーリエ変換再構成像は, 周辺部において振幅がやや低下している. これは, サンプリング長が有限長である効果と等価と考えられる sinc 関数との畳み込み演算が, 振幅変調を受

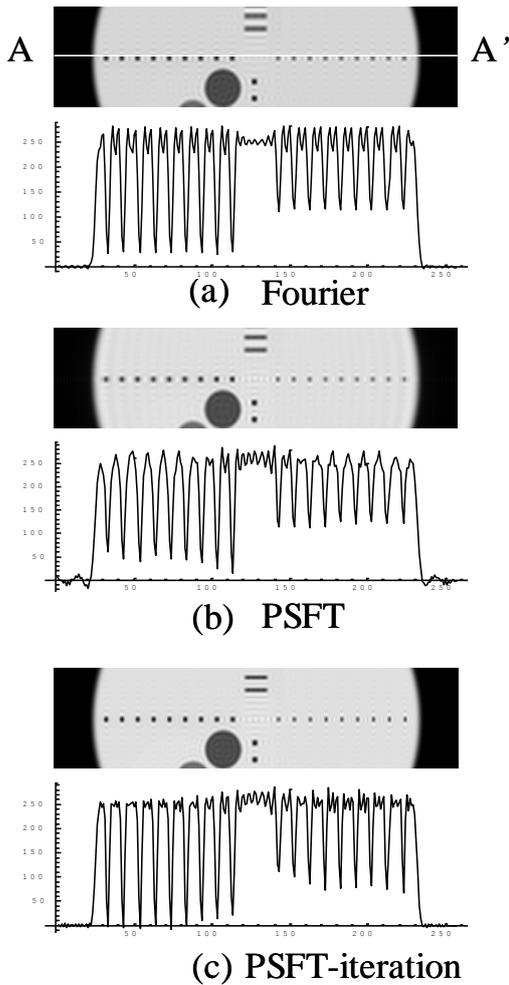


Fig.3 Comparison of reconstructed images; (a) Fourier reconstructed image, (b) reconstructed image from PSFT signal, (c) reconstructed image by PSFT signal with band-expansion algorithm.

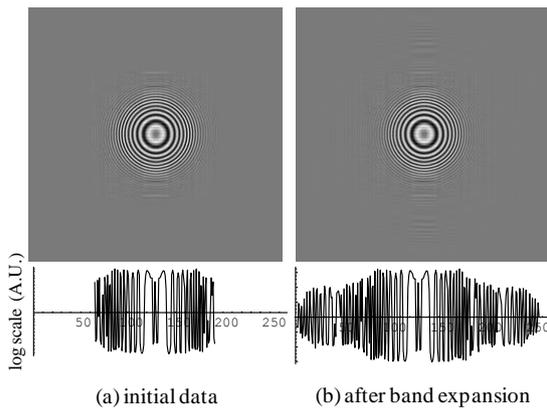


Fig.4 1-dimensional profiles of PSFT signal; real part of the signal are shown. (a) before and (b) after the band-expansion algorithm.

けた関数との間で行われるため、位相変調の大きい周辺部では sinc 関数の主ローブ内の平均化により情報を失い、その結果として

“けられ”が生じるものと解釈できる. しかしながら, (c)の反復処理後の画像では信号帯域の復元によりけられが回復し鮮明な像になっている. Fig.5 より, 概ね中心からの座標に比例して分解能が改善されること, $\gamma b\tau$ が大きいほど高い分解能の改善効果が得られることなど, 理論検討と符合する結果が得られている. しかしながら, $\gamma b\tau$ が大きくなって分解能の改善は最大で2倍までに留まっている. 式(8)で与えられる $\gamma b\tau$ を超えると再生像に生じた“けられ”が反復処理によっても回復しなくなる結果となった. これは, サンプル定理を満足しなくなることが原因と考える.

Fig.6 は, 数値モデルシミュレーションと同条件を使用し MR 画像の再生シミュレーションを実施した結果である. 信号データ数が 128×128 の PSFT 信号を計算し, 提案法の適用による分解能の改善を試みた. $h=1.0$ とし, $\gamma b\tau=0.61 \text{rad/cm}^2$ として計算した PSFT 信号に対し提案法を適用した. (a)は通常のフーリエ変換法による再生像, (b)は PSFT 信号に帯域拡張処理を適用した結果である. 提案法の適用により, 通常のフーリエ変換再構成像に

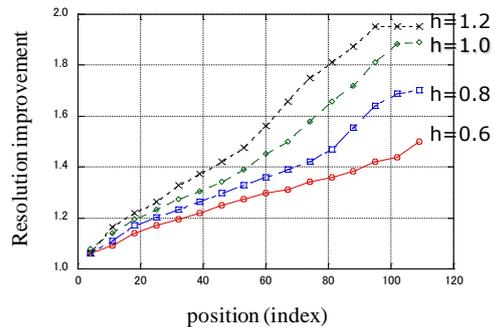


Fig.5 Simulation results of resolution improvement as a function of spatial coordinate .



Fig.6 Simulation results using an MR image model. (a) reconstructed image using PSFT signal, (b) reconstructed image using PSFT band-expanded signal.

比べて、特に周辺部において高い分解能が得られている。

(2) 高速イメージングへの応用

パラメータは信号のデータマトリクスが 128×256 、分解能 $\Delta x = 0.1 \text{ cm}$ 、 $\Delta x' = 0.2 \text{ cm}$ 、位相拡散パラメータ $\gamma b \tau = 1.227 \text{ rad/cm}^2$ とした。PSFT 信号に乗算する重みとして一次関数を利用した。

Fig.7(a)に PSFT の信号強度、(b)に(a)のフーリエ変換再構成画像、(c)に折り返し画像(b)から提案法によって折り返しを取り除いた再構成画像を示す。Fig.7(d)には(c)の拡大画像、(e)には 256×256 のフルデータを使用した場合のフーリエ変換(FT)による再構成画像(目標画像)の中央領域、(f)には(a)の信号と同量の (128×256) 信号を使用した場合の FT による再構成画像の中央領域を示す。これらの結果から、折り返し像が僅かに残るが、折り返しの殆どない画像の再生が可能であることがわかる。また、画像中央部の分解能はフルデータ再構成像に比肩していることがわかる。Fig.8 と Fig.9 には、高速化を高めた場合として、 84×256 と 64×256 の信号データから再生した映像を示す。信号の振幅分布とフーリエ変換再生像を、それぞれ (b-1),(b-1), (c-1), (c-2) に示す。通常のフーリ

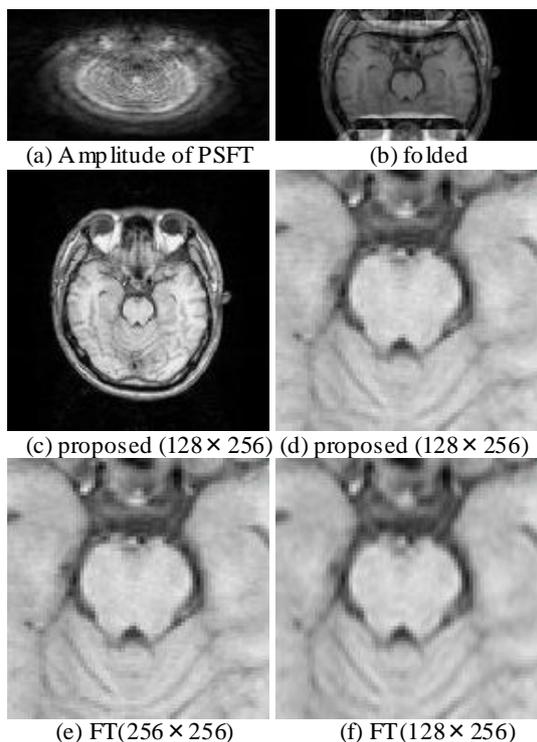


Fig.7 Simulation results of using MR image model: (a) Amplitude of PSFT signal in 2-fold under-sampled condition, (b) folded image, (c) proposed method, (d) magnified image by proposed method, (e) Fourier transform (FT) image with 256×256 data, (f) FT image with 128×256 data.

エ変換再生像では像の折り返しが二重、三重に発生していることが(b-2)や(c-2)からわかる。提案法により再生した映像を Fig.9 に示す。(a)はフルデータ再生像、(b),(c),(d)は、それぞれ(a-1), (b-1), (c-1)の信号を提案法により再生した映像である。分解能は信号量の少量化とともに低下しているが、像の折り返しの少ない画像が得られていることがわかる。本方法により再生誤差が認められるものの $1/4$ のデータ量でも、画像再生の可能性が示された。

提案法の有効性を示すために実験データを利用し再構成を行った。その結果、シミュレーションと同様な結果を得ることができた。

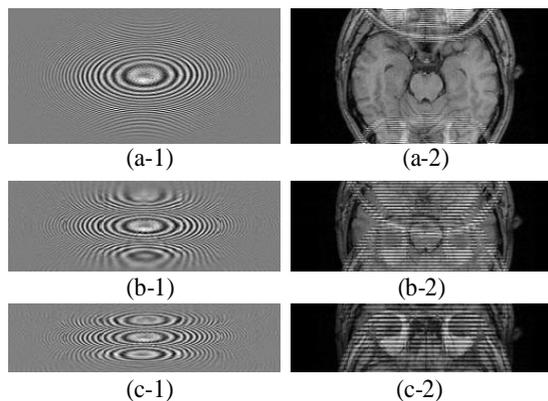


Fig.8 PSFT signals supposing the acceleration factor 2 (128×256), 3 (84×256), 4 (64×256) and reconstructed images by Fourier transform.

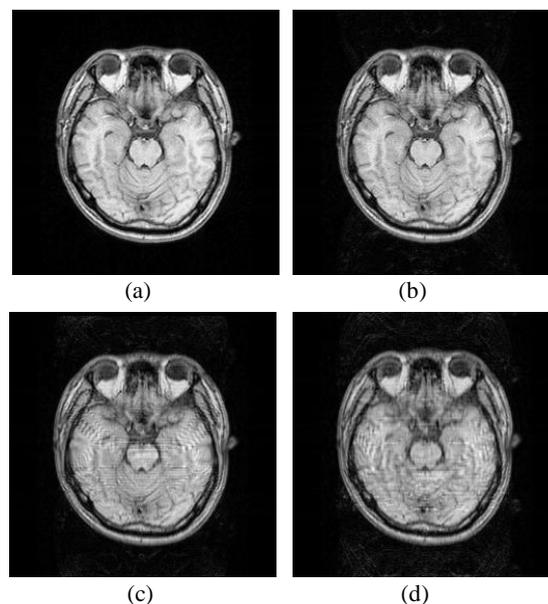


Fig.9 Results of synthesized image in proposed method. (a) reconstructed image using fully scanned signal data, (b), (c) and (d) show the synthesized image using a single signal shown in Fig.4 (a-1),(b-1) and (c-1), respectively.

提案法は汎用のフーリエ変換映像法に対し、被写体に二次の位相変調を与えるパルスを追加する必要があるが、信号の収集軌跡は信号空間において原点対象であるので、収集した信号から直接的に位相分布の計測も可能である。提案法とハーフ・フーリエ法を比較すると、ハーフ・フーリエ法では位相分布を原点付近の信号のみから求めるため、一般に細かな位相変化には対応できない。それに対し、提案法は収集した全データから位相分布を求めることができるので、詳細な位相変化の測定が可能である。提案法は、雑音や位相誤差の有無にかかわらず、信号に重み関数を与えて SENSE 法による画像再構成を行えばよいので再生誤差が少なく、簡便な方法である。

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 4 件)

- ① 山田芳文, 伊藤聡志, PSFT-MRI における修正 Gerchberg 法によるデータ内挿法を用いたエイリアスレス映像再構成, *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, vol.26, No.4, pp.225-231(2008), 査読有
- ② Satoshi ITO, Yoshifumi YAMADA, Alias-free Image Reconstruction using Fresnel Transform in Phase-Scrambling Fourier Imaging Technique, *Magnetic Resonance in Medicine*, vol.60, pp.422-430(2008), 査読有
- ③ 伊藤聡志, 劉 娜, 山田芳文, 位相拡散フーリエ変換法と超解像法的手法による MRI 測定時間の短縮, *日本磁気共鳴医学会誌*, vol.28, no.2, pp.142-153(2008), 査読有
- ④ 伊藤聡志, 中村 俊, 劉 娜, 山田芳文, 位相拡散フーリエ法を用いた MR アンチエイリアス画像再構成, *電子情報通信学会論文誌*, vol.J90-D, No.4, pp.1149-1157 (2007), 査読有

[学会発表] (計 10 件)

- ① 伊藤聡志, 川和康宏, 山田芳文, 位相拡散フーリエ法を利用したシングルコイル・パラレルイメージングの画質改善, *電子情報通信学会 2009 年総合大会*, D-16-14, p. 264(2009.3.19), 松山.
- ② 伊藤聡志, 川和康宏, 森田圭介, 山田芳文, 位相拡散フーリエ法を利用したシングルコイル・パラレルイメージングの基礎検討, *電子情報通信学会技術報告*, vol. 108, no. 209, MI2008-39, pp.

21-26(2008.09.17), 京都.

- ③ 山田芳文, 伊藤聡志, 粗サンプリング位相拡散フーリエ法における修正 Gerchberg 法によるエイリアスレス映像再構成, 第 36 回日本磁気共鳴医学会大会, O-2-227, p.240(2008.9.11), 旭川.
- ④ 川和康宏, 伊藤聡志, 下田友嗣, 山田芳文, PSFT 信号空間重み適用型シングルコイル・パラレルイメージングの基礎検討, 第 36 回日本磁気共鳴医学会大会, P-1-93, p.325(2008.9.11), 旭川.
- ⑤ 森田圭介, 伊藤聡志, 下田友嗣, 山田芳文, アンチエイリアス再構成を利用したシングルコイル・パラレルイメージングの基礎検討, 第 36 回日本磁気共鳴医学会大会, P-1-93, p.325(2008.9.11), 旭川.
- ⑥ 山田芳文, 伊藤聡志, PSFT-MRI における修正 Gerchberg 法によるデータ内挿法を用いたエイリアスレス映像再構成, 第 27 回日本医用画像工学会, C2-06, Proceedings on CD-ROM(2008.8.5), 東京.
- ⑦ 川和康宏, 伊藤聡志, 山田芳文, PSFT 信号空間重み適用型シングルコイル・パラレルイメージングの検討, 第 27 回日本医用画像工学会, C2-05, Proceedings on CD-ROM(2008.8.5), 東京.
- ⑧ 森田圭介, 伊藤聡志, 山田芳文, 画像空間重み適用型シングルコイル・パラレルイメージングの検討, 第 27 回日本医用画像工学会, C2-04, Proceedings on CD-ROM(2008.8.5), 東京.
- ⑨ 下田友嗣, 劉 娜, 伊藤聡志, 山田芳文, 位相拡散フーリエ変換法を利用した MR 画像の高分解能再生, *電子情報通信学会 2008 年総合大会*, D-16-3, p.270(2008.3.18), 北九州.
- ⑩ 伊藤聡志, 劉 娜, 山田芳文, 位相拡散フーリエ変換映像法を用いた信号の外挿による高分解能化, 第 35 回日本磁気共鳴医学会大会, EP-1-115, p.333 (2007.9.26), 神戸.

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・准教授
研究者番号：80261816

(2) 研究分担者

山田芳文(YAMADA YOSHIFUMI)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70005429

(3) 連携研究者

なし