

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19790900

研究課題名 (和文) BPE の臨床応用に向けた基礎研究

研究課題名 (英文) Fundamental study of BPE for its clinical applications

研究代表者

森口央基 (MORIGUCHI HISAMOTO)

東海大学・医学部・講師

研究者番号：70296705

研究成果の概要 (和文)：本研究では Bunched Phase Encoding (BPE) という新しい MRI 高速撮像方法について、実際の撮像時の操作の簡便性の向上や画質の改善を目的とし、それぞれにつき新たな手法を開発した。また、以前より知られる高速撮像法である spiral imaging において、データの収集密度を減少させても画像上のアーチファクトを抑制する画像再構成法を開発し、さらなる高速化を可能にした。

研究成果の概要 (英文)：In this study, a new fast MRI pulse sequence 'Bunched Phase Encoding (BPE)' has been further investigated. New techniques have been developed to readily perform BPE scanning and improve quality of the images. Furthermore, a new reconstruction method in spiral imaging has been developed. In this method, while data are under-sampled, no apparent aliasing artifacts can be observed in the images.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	0	1,600,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	480,000	3,680,000

研究分野：放射線医学

科研費の分科・細目：MRI

キーワード：放射線医学、MRI、高速撮像、画像再構成

## 1. 研究開始当初の背景

(1) BPE は本研究代表者によって世界で初めて開発された新しいタイプの MRI 高速撮像法である。撮像時間を短縮する必要がない状況でも、BPE を使用すれば同時間内に従来の撮像方法より高解像度の画像を得ることができる。

(2) BPE では高速撮像法として極めて有用な方法だと考えられるが、画像上の信号雑音比 (Signal-to-noise ratio: SNR) がしばしば低下する。

## 2. 研究の目的

(1) BPE ではジグザグの k 空間軌道を用いるが、画像再構成のためにその正確な軌道が必要である。通常は軌道の測定が必要だが、

その測定は実際の撮影における操作を煩雑にする。軌道を測定せずとも画像を再構成する方法の開発をまず目的とした。

(2) BPE では画像上の SNR の低下が最も大きな問題の一つである。画像の再構成方法を工夫することにより、画像上の SNR を改善することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) BPE で用いるジグザグ軌道の波形は、ある一定のパターンを繰り返すことによりデザインされる。この特性と、さらに MRI のデータ空間 (これを  $k$  空間という) 上における座標の shift は画像上での位相の線形 shift になるという性質を利用して、ジグザグ軌道のデータの位置を計算により求めていく。

(2) BPE では、画像を再構成する際データの位置を元に作られた行列から逆行列を作り、これをデータにかけることにより画像を計算により求める。この際、逆行列の安定性が画像の SNR に大きく関与する。一般に安定性が低ければ画像の SNR も低くなる。そこでいかに逆行列の安定性を高めていくかが目標となる。Focal underdetermined system solver (FOCUSS) という方法に着眼し、繰り返し法により noise 成分の増幅を抑える。

### 4. 研究成果

(1) 前述の通り、BPE ではジグザグの  $k$  空間軌道を用いる。折り返しアーチファクトを出現させずに画像を再構成するためには、正確な  $k$  空間軌道の情報が必要である。この軌道の情報は従来測定によって得られたが、本研究では実際に測定することなく、得られた  $k$  空間のデータから直接算出する方法を開発した。ここにその方法を簡単に述べる。

まず、この方法では  $k$  空間の中心部のデータを辺縁部より高密度に収集し、位相エンコードの方向には折り返しアーチファクトが出ないようにする。次に、ジグザグ軌道の波形はある一定のパターンを繰り返すことにより構成されていることに着目し、各ユニットにて位相エンコード方向には同じ位置にあるデータだけを選択し、これらのデータのみを使い画像を再構成する。こうしてできる画像は読み取りエンコードの方向にのみアーチファクトを持つ画像である。位相エンコード方向のデータの位置により、これらの画像は画像上での位相シフトの量が少しずつ異なってくる。この位相シフトの量を初め 0 と仮定し、読み取りエンコードの方向のアーチファクトを取り除く。その後、できた画像から  $k$  空間のデータを計算によって求め、先

ほどと同様に、位相エンコードの方向に同じ位置にあるデータのみ取り出し、画像を再構成する。この画像と最初に作った画像のそれぞれの位相シフトを比較することにより、 $k$  空間でのデータの位相エンコード方向の位置のずれを算出することができる。上記の方法は繰り返し法によって精度をあげていくことができる。通常は 5~6 回繰り返すことにより、測定した場合とほぼ同一のジグザグ波形を算出することができた。Fig.1 にその例を示す。図 1 は、人体の腹部の BPE の画像で、a, b はそれぞれ繰り返しを一回、6 回行った後に得られた軌道で画像を再構成したものである。a では折り返しアーチファクトが少し残存しているが、b ではアーチファクトはほぼ認識することができないレベルまで低下している。この事実は 6 回の繰り返しのほぼ正確な  $k$  空間軌道が算出できることを意味する。この方法により、BPE を実際に MRI 撮像に使う際  $k$  空間の軌道を測定する必要がなくなるため、大変有用であると考えられる。

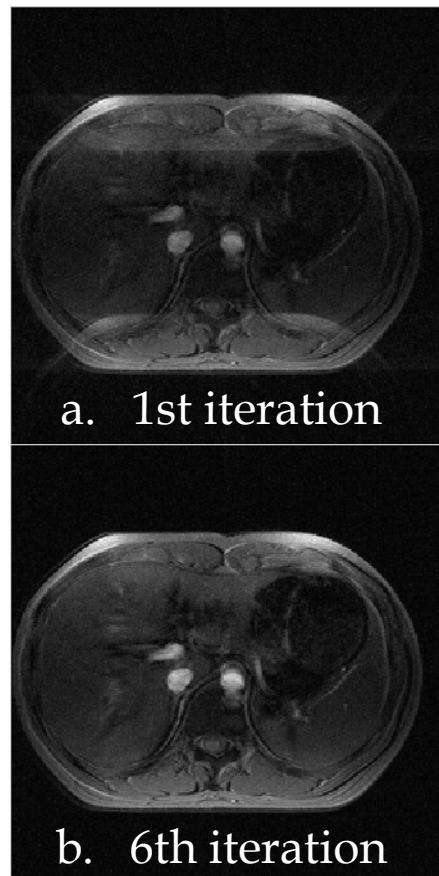


Fig.1 Variable density BPE

(2) FOCUSS とは、収集された  $k$  空間のデータが少ない場合に、できるだけアーチファクトを少なく画像を再構成するための有用なアルゴリズムとして近年 MRI で使用されるよ

うになった。今までは projection reconstruction と dynamic imaging のみの適用が知られていたが、本代表研究者はこれを spiral imaging と BPE に適用し、いずれも画質の著明な改善を認めた。以下に spiral imaging に適用した場合の具体的な方法を述べる。FOCUSS の BPE への適用方法は次節で述べる。

FOCUSS は繰り返し法を用いるが、最初の推定画像が必要である。Spiral imaging では中心部から  $k$  空間のデータ収集が始まるため、中心部のデータをやや高密度に収集すれば、低周波画像が容易に作成できる。これを最初の推定画像とする。次に FOCUSS の原理に基づき徐々に画像の高周波成分を現していく。ここで一つの問題点として、spiral imaging では  $k$  空間のデータが正規直交座標上に取られていないため、直接フーリエ変換や逆フーリエ変換を施すことができない、ということが挙げられる。この問題点は、次のようにして回避した。実際に再構成する画像の画素数よりも大きな行列（通常 2<sup>n</sup> 倍。n は整数）を用意し、この拡大された行列の中で最も近い正規直交座標の点に、spiral 曲線上に取られたデータを格納する。この際、若干のデータの位置のずれが生じるが、拡大率が 8 倍以上の場合、このずれはほとんど問題となること

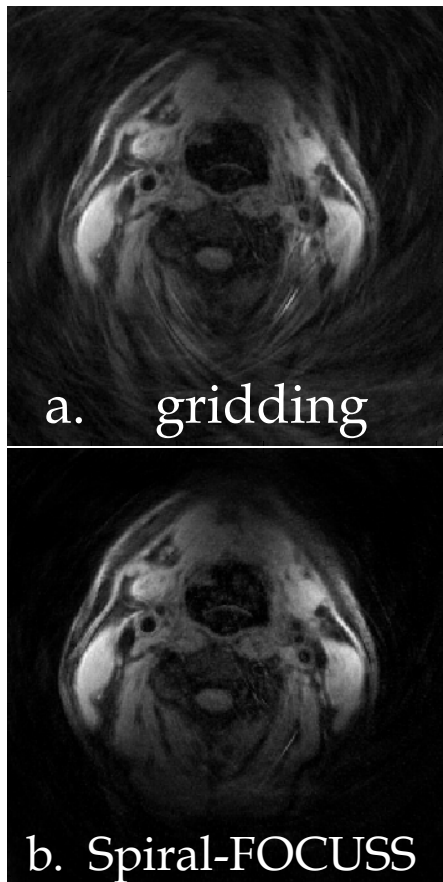


Fig.2 50% spiral data

はない。この方法により、spiral imaging の場合でも FOCUSS を使って画像を再構成することが可能になった。Fig.2 はその例であり、人体頸部の断面を spiral imaging 法でとり、FOCUSS を用いて再構成したものである。

収集されたデータは Nyquist の規準で必要なデータの数の約 50% である。従って、撮像時間は従来のおよそ半分となっている。a は通常の gridding 法で、b は FOCUSS を用いてそれぞれ再構成した画像である。a では画像全体に散らばるようにアーチファクトが見られる。これは収集データが少ないために起こる spiral imaging での aliasing artifacts である。このアーチファクトは b では著明に減少している。これは spiral imaging にて FOCUSS が非常に有用であることを示すものである。この方法は spiral-FOCUSS と名づけられた。

(3) BPE への FOCUSS の応用について述べる。BPE では元々  $k$  空間のデータは減らして収集するが、画像上折り返しアーチファクトは出現しない。ただし時に SNR が低下する。本研究では BPE に FOCUSS を適用することにより、SNR を上昇させる方法を開発した。以下にその具体的な方法を述べる。

まず  $k$  空間上に取られたデータを高周波成分と低周波成分に分ける。画像上の noise は高周波成分の信号誤差とみなされるため、高周波成分の信号のうち、被写体の細かい構造を作る信号をできるだけ残し、その他の信号をできるだけ低下させるのが目標となる。FOCUSS は大きい信号をできるだけ残しつつ、小さな信号をできるだけ低下させる、という non-linear filter の役割を持っているため、この特徴を活用する。FOCUSS では繰り返し法により徐々に画像を再構成していくことになるが、最初の段階では前節で述べたように推定画像が必要である。これには初めに分離した高周波成分のデータから再構成した画像を用いる。これは被写体の細かい構造を表現しているが、通常 noise が大きいものである。この画像からスタートし、FOCUSS を適用することにより繰り返し法で noise 成分を少しずつ減少させていく。この方法では新たな折り返しアーチファクトを出現させることなく noise 成分を減少させることが可能であり、今までの実験では 2~3 回程度の繰り返しでアルゴリズムは収束するため、画像の再構成は短時間で終了する。この方法は BPE-FOCUSS と名づけられた。Fig.3 に phantom 画像を示す。a は従来の BPE 画像、b は BPE-FOCUSS の画像である。両者を比べるとわかるように、b では a に比べて noise レベルが著明に減少している。実測値では SNR は b は a の 2.2 倍であった。この例を見ても

わかるように、従来 BPE の画像では SNR が低いことが難点の一つであったが、この短所を補いあらたなアーチファクトを出現させない BPE-FOCUSS は、大変有用な画像再構成法と言えよう。

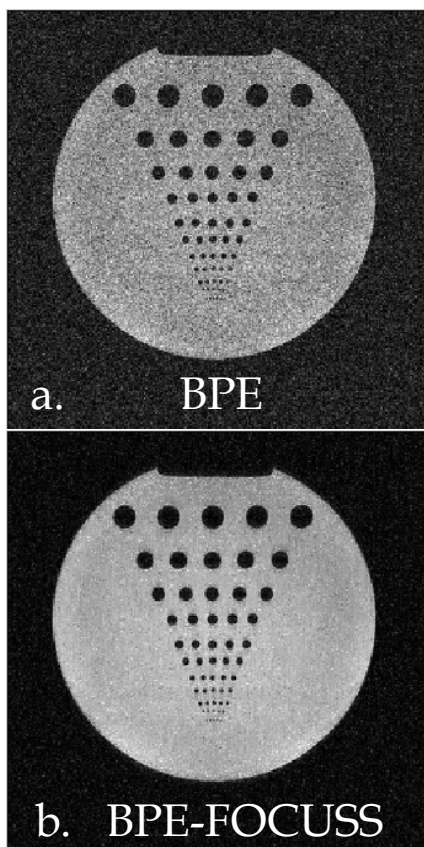


Fig.3 BPE vs. BPE-FOCUSS

#### 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 2 件)

- ① Seiberlich N, Breuer FA, Ehses P, Moriguchi H, Blaimer M, Jakob PM, Griswold MA. Using the GRAPPA operator and the generalized sampling theorem to reconstruct undersampled non-Cartesian data. *Magnetic Resonance in Medicine* 2009; 61:705-715.
- ② Breuer FA, Moriguchi H, Seiberlich N, Blaimer M, Jakob PM, Duerk JL, Griswold MA. Zigzag sampling for improved parallel imaging. *Magnetic Resonance in Medicine* 2008; 60:474-478.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 森口 央基、今井 裕. Improved MR reconstruction using FOCUSS. 第 37 回日本磁気共鳴医学会大会 2009 年 10 月 2 日、パンパシフィック横浜ベイホテル東急 (神奈川) .
- ② Moriguchi H, Imai Y. Spiral MR reconstruction using FOCUSS. 17 th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine, April 20th 2009, Honolulu, USA.
- ③ Moriguchi H, Imai Y, Duerk JL. Variable density bunched phase encoding. 16 th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine May 7<sup>th</sup> 2008, Toronto, Canada.
- ④ Moriguchi H, Duerk JL. A single scan two-point Dixon technique for projection reconstruction using bunched projection phase encoding. 15 th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine May 23<sup>rd</sup> 2007, Berlin, Germany.

[産業財産権]

○取得状況 (計 3 件)

- ① 名称 : Efficient methods for reconstruction and deblurring of magnetic resonance images  
 発明者 : Jonathan S. Lewin, Hisamoto Moriguchi, Jeffrey L. Duerk, Brian M. Dale  
 権利者 : Jonathan S. Lewin, Hisamoto Moriguchi, Jeffrey L. Duerk, Brian M. Dale  
 種類 : 特許  
 番号 : US patent 7545966  
 取得年月日 : 2009 年 6 月 9 日  
 国内外の別 : 国外 (米国)

- ② 名称 : Efficient method for MR image reconstruction using coil sensitivity encoding  
 発明者 : Hisamoto Moriguchi, Jeffrey L. Duerk  
 権利者 : Hisamoto Moriguchi, Jeffrey L. Duerk  
 種類 : 特許  
 番号 : US patent 7486839  
 取得年月日 : 2009 年 2 月 3 日  
 国内外の別 : 国外 (米国)

- ③ 名称 : Bunched Phase Encoding (BPE)  
 発明者 : Hisamoto Moriguchi, Jeffrey L. Sunshine, Jeffrey L. Duerk  
 権利者 : Hisamoto Moriguchi, Jeffrey L. Sunshine, Jeffrey L. Duerk  
 種類 : 特許

番号：US patent 7301342  
取得年月日：2007年11月27日  
国内外の別：国外（米国）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森口央基 (MORIGUCHI HISAMOTO)  
東海大学・医学部・講師  
研究者番号：70296705

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：