

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：32617

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22791223

研究課題名（和文） FOCUSS を用いた MRI 高速撮像法の画質改善

研究課題名（英文） Improvements of fast MRI using FOCUSS

研究代表者

森口 央基（MORIGUCHI HISAMOTO）

駒澤大学・医療健康科学部・教授

研究者番号：70296705

研究成果の概要（和文）： Focal Underdetermined System Solver (FOCUSS)というアルゴリズムをいくつかの MRI 高速撮像法に適用することにより、画質の改善を目的とする研究を行った。各撮像法ではデータの収集方法が異なるため、それぞれ適用の仕方を工夫する必要がある。本研究では、いずれの撮像法でもデータ不足によるアーチファクトを低減させることを可能にした。

研究成果の概要（英文）： Image quality was improved by using FOCUSS algorithm in several fast MRI methods. Methods to apply FOCUSS needs to be modified in each data acquisition method. Artifacts caused by reduced data acquisition were significantly reduced in each acquisition method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

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

いかにして撮像時間を短縮するかという問題は MRI において最も重要な研究課題の一つである。今まで様々な高速撮像法が開発されてきたが、そのほとんどは画質の劣化を避けられなかった。これは、撮像時間の短縮による取得データ数の減少や、信号雑音比（SNR）の低下などに起因している。FOCUSS とはもともと異分野で使われていたアルゴリズムであったが、最近 MRI の画像再構成の研究に導入され、MRI の画質改善

において徐々にその有用性が示されつつあった。

2. 研究の目的

FOCUSS を応用し、従来の高速撮像法の画質を向上させたり、さらに撮像時間を短縮させたりすることを目的とした。FOCUSS は、MRI のデータの収集パターンによってその適用方法は異なる。本研究では代表的な高速撮像法のデータの収集パターンに対し、FOCUSS の応用の仕方を考え、画質の向上を試みると同時に、FOCUSS の応用方法自

体についても研究を行なった。

3. 研究の方法

本研究で取り扱った高速撮像法は、回転と移動のいずれの動きの補正も可能なことでよく知られている PROPELLER、歴史的に長く使われている partial Fourier imaging (PFI)、本研究代表者の造詣の深い BPE と spiral scan である。上記の各撮像方法において FOCUSS の適用の仕方は異なる。各撮像法でのデータのサンプリングパターンを考慮した上で、適切な FOCUSS の適用方法を見出した。

4. 研究成果

(1) PROPELLER とは、撮像中に被写体が動いた場合にその補正が可能なことでよく知られた撮像法である。この方法では、一回の繰り返し時間 (TR) で帯状の領域内にある何本かの平行な線に沿って k-space のデータを収集する。これを各 TR で少しずつ回転させることにより、全ターゲット k-space のデータを収集するものである。K-space の中心部のデータはどの TR においても各帯によって常に収集されるため、この中心部のデータを相互に比較することにより回転と移動をともに補正できるという仕組みである。一般に k-space の中心部のデータは SNR が高く、このため PROPELLER における動きのアーチファクトの補正は、安定していると言える。ただし、PROPELLER の最大の難点は撮像時間が長いことである。中心部とその近傍のデータを何度も繰り返し収集するため、通常の高速スピネコーに対し、少なくとも撮像時間は 1.5 倍延びると言われている。本研究では、PROPELLER のデータ収集パターンと画像再構成法をともに工夫することにより、画質の劣化を食い止めつつ、撮像時間を短縮することを試みた。

図 1 に示すように、新しいデータ収集法では従来平行だった k-space の軌道を両端で広

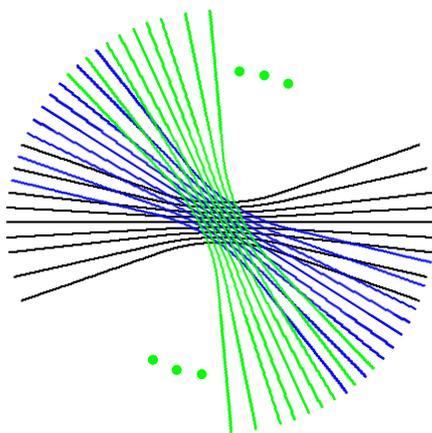


図 1. bowtie PROPELLER の k-space

げることにより、蝶ネクタイのような形状の k-space の領域を一回の TR で網羅する。つまり、一回の TR におけるデータ収集の範囲を拡大することにより、少ない TR cycle 数で k-space 全体を埋めることができるため、撮像時間を短縮できる。この方法は、蝶ネクタイ型の領域のデータ収集を行うことから bowtie PROPELLER と名付けられた。bowtie PROPELLER では、従来の PROPELLER と同様、k-space の中心部のデータを全ての blade が収集するため、動きの補正は可能である。ただし、図 1 を見るとわかる通り、k-space の辺縁部においてデータの収集密度が低下しているため、再構成した画像には高周波成分のデータ不足によるアーチファクトが出現する。このアーチファクトは画像再構成時に FOCUSS を適用することによって軽減させることが可能であった。



図 2. bowtie PROPELLER による頭部 MRI

図 2 は bowtie PROPELLER を使って撮影した頭部 MRI の画像である。a, b はそれぞれ動きの補正前、後である。b の画像は FOCUSS を使って再構成している。この結果を見てわかる通り、bowtie PROPELLER に FOCUSS を適用す

ると、動きの補正が効果的に行われていると同時に、高周波成分のデータ不足によるアーチファクトも目立たせることなく、画像を再構成できる。

この bowtie PROPELLER は、従来の PROPELLER に比べて撮像時間は約 1/2 であり、この撮像法が臨床の現場で使用されれば、撮像時間、画質の両面から極めて役に立つ撮像法であると考えられる。

(2) PFI は以前より MRI で最もよく使われている撮像時間短縮法の一つである。一般的な基盤の目状の k-space のデータ配列を考える。PFI では、TR cycles の総数を減らすことにより、k-space のデータを一部しか収集せず、その少ないデータからできるだけアーチファクトを抑えた画像を作ることを目標としている。PFI では様々な画像再構成法が考案されているが、そのほとんどは画像の位相分布を既知とし、位相情報をもとに画像を再構成するものである。ただし、正確な画像の位相情報を把握することは、収集データ数の減少に伴い極めて困難になる。このため、多くの場合 70% 程度のデータは必要である。つまり、撮像時間は本来の時間の 7 割程度に縮められるがそれ以上の短縮は難しい。本研究では、PFI のデータ収集法を工夫し、さらに画像再構成法に FOCUSS を適用することにより、一層の撮像時間の短縮を試みた。

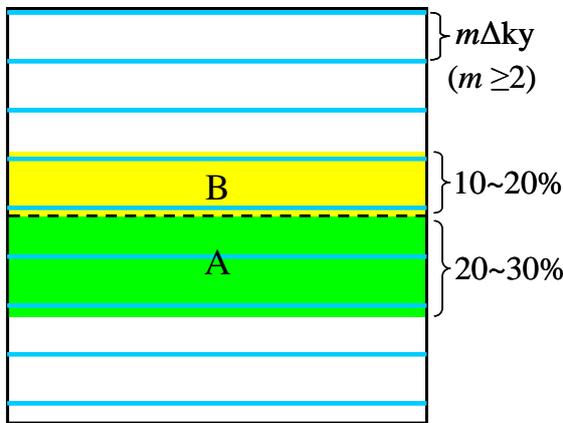


図 3. PF-FOCUSS の k-space

図 3 は新しい PFI の k-space のデータの埋め方である。色がついている部分が k-space のデータ収集を行う領域である。図 3 を見てわかる通り、この方法では k-space の中心部は密に、それ以外の部分は疎にデータを収集している。この方法は PF-FOCUSS と名付けられた。再構成では、中心部のデータから低周波成分による画像をつくり、これをもとに高周波成分の信号を再構成していく。PF-FOCUSS では位相の情報は一切使用していない。中心部のデータと辺縁部のデータのバランスを

考えることにより、データの総量を 70% 未満にすることも十分可能である。

図 4 は高速スピネコー法で撮像した頭部 MRI である。a は 100% のデータを収集して逆フーリエ変換により再構成した画像、b は 50% のデータを収集して PF-FOCUSS により再構成した画像である。これらの画像を比べると両者の間には画質にほとんど差がないことがわかる。つまり、この結果からほとんど画質を落とすことなく、撮像時間を 50% にすることが可能であることが示唆される。

PF-FOCUSS は撮像系列に全く変更を施す必要がないため、技術的には臨床への応用も全く困難はなく、近い将来臨床の現場で大いに役立つことが期待される。

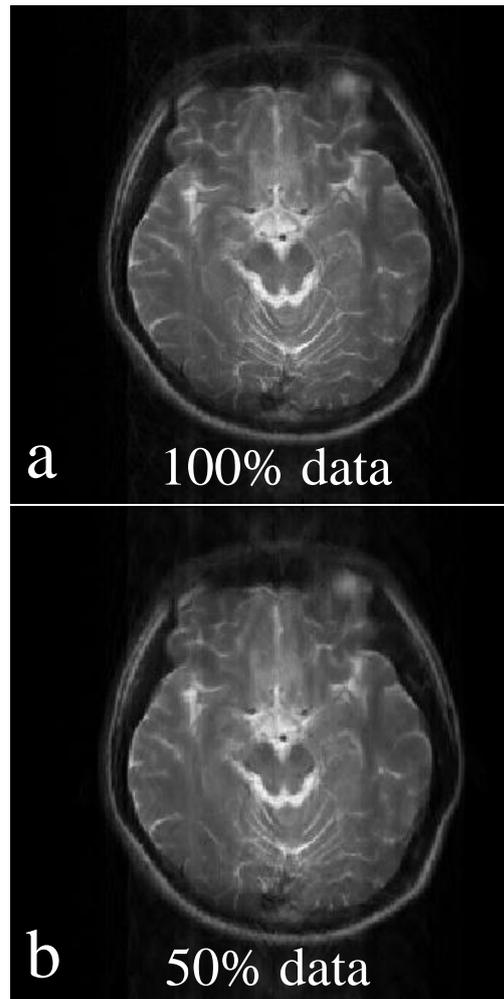


図 4. Brain MRI.

- a. standard acquisition
- b. PF-FOCUSS

(3) Bunched Phase Encoding (BPE) は本研究代表者によって考案された撮像法で、ジグザグの k-space 軌道に沿ってデータを収集する方法である。ジグザグの k-space 軌道は複数

の位相エンコードをしていることに該当するため、BPE では TR cycle の総数を減らすことができ、その結果、撮像時間を短縮することができる。本研究では、BPE の撮像時間をさらに短縮するために隣同士のジグザグ軌道の間隔を拡げ、画像再構成法には FOCUSS を適用した。この方法は BPE-PF-FOCUSS と名付けられた。BPE-PF-FOCUSS の k-space のデータ収集のパターンとしては、図 3 に示す PF-FOCUSS の各ブルーラインがジグザグになり、このライン同士の間隔がより広くなったものと考えてよい。

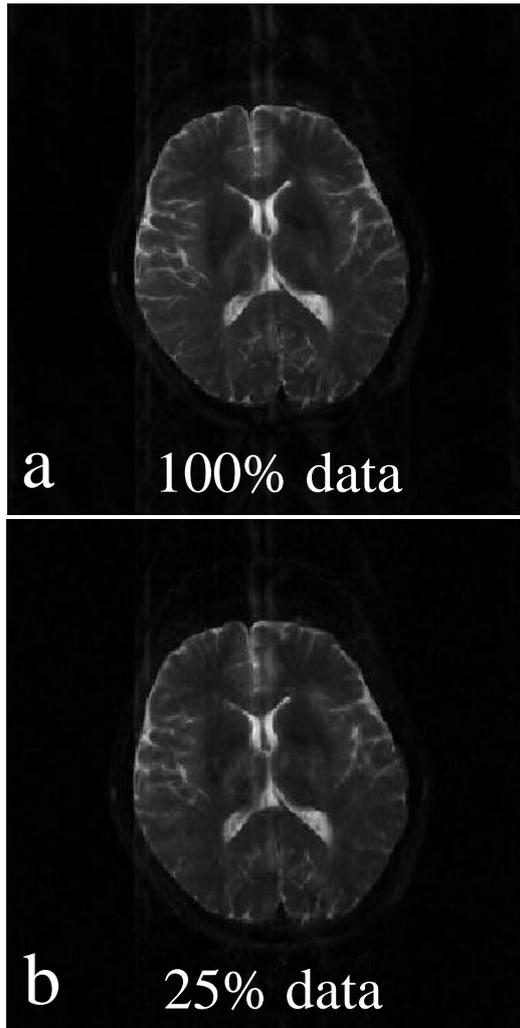


図 5. Brain MRI.
a. standard acquisition
b. BPE-PF-FOCUSS

図 5 に結果を示す。これらは高速スピエンコー法で撮像した頭部 MRI の画像である。a は 100% のデータを収集して逆フーリエ変換により再構成した画像、b は 25% のデータを収

集して BPE-PF-FOCUSS により再構成した画像である。BPE-PF-FOCUSS は収集データをわずか 1/4 に減らしているにもかかわらず、従来の画像とその画質においてほとんど遜色ないことがわかる。

BPE-PF-FOCUSS は k-space の軌道をジグザグにデザインするため撮像系列に手を加える必要があるが、このジグザグ軌道を組み込むことができれば臨床にも使用可能であり、より一層高速の MRI 撮像が達成できるであろう。

(4) spiral MRI は echo planar imaging (EPI) の亜型で、現在の MRI 撮像系列のうちで最も速い撮像法の一つである。一般的な 2 次元の臨床画像であれば撮像時間は通常 1 秒以下である。spiral MRI の最大の難点は磁場が不均一の際、その部分に画像のボケが現れることである。これを off-resonance artifacts という。この off-resonance artifacts を補正するために、spiral scan では周波数 map を必要としていた。これは画像上の各領域においてどのくらい周波数がずれているかを示す map である。ただし、この周波数 map を作成するためにはエコー時間を少し変えて 2 度撮影を行わなければならない。高速撮像法として知られる spiral scan だが、2 度撮影を行うことは撮像時間の延長につながり、最大の長所を損なうことにもなりかねない。本研究では 2 度撮影を行わなくてもボケを補正する方法を考案した。それは、edge 画像を作り、この edge 画像に試しにいくつかの周波数（例えば 10Hz おき）でボケの補正を行い、最も edge がくっきりした時、そこで使われた周波数を、その領域の off-resonance 周波数とする、という方法である。この方法では FOCUSS の基本概念でもある L1 norm 最小化という考え方を基盤としている。即ち、画素値の L1 norm が最小となったとき、その領域での信号の拡がり方が最も少ない（=画像上はくっきりしている）という、ことである。この方法にて周波数 map を作成しなくても効果的に spiral scan のボケの補正を行うことができた。

図 6 はその結果である。a はボケの補正前の画像、b は補正後である。b にて矢印や楕円で示した領域を a と比較すると、いずれもボケのアーチファクトが改善されていることがわかる。この方法を使えば、従来 2 度行なっていた spiral MRI の撮影を一度で済ませることができ、さらなる高速化につながると予想される。Spiral MRI はもともと撮像時間が短いので、更なる高速化は撮像中に被写体が動いたときの動きのアーチファクトの軽減や dynamic imaging において temporal resolution を上げるのに役立つものと期待される。

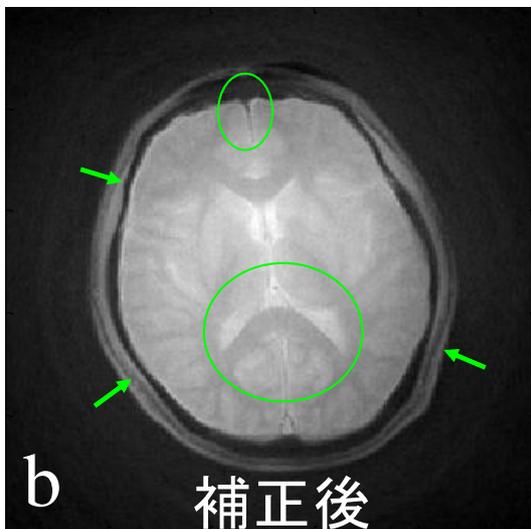
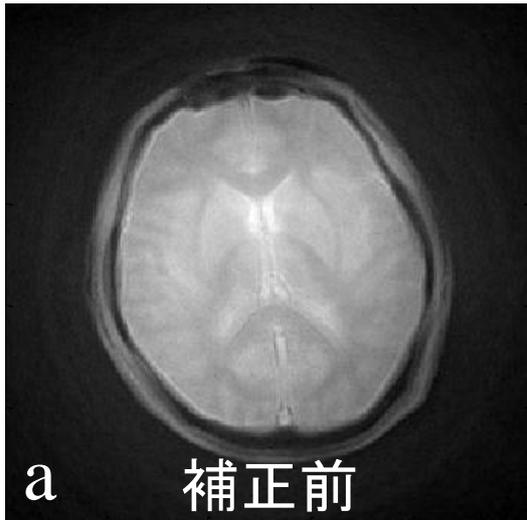


図 6. spiral MRI における off-resonance artifacts

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)

[学会発表] (計 5 件)

① Moriguchi H, Yoshikawa K, Shimada M, Urayama S, Imai Y, Honda M, Hanakawa T. Novel automatic off-resonance correction without field maps in spiral imaging using L1 minimization. 20th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 8th 2012, Melbourne, Australia.

② Moriguchi H, Yoshikawa K, Shimada M, Urayama S, Imai Y, Honda M, Hanakawa T. Further acceleration of Partial Fourier-FOCUSS using Bunched Phase Encoding. 20th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 9th 2012, Melbourne, Australia.

③ Moriguchi H, Urayama S, Imai Y, Honda M, Hanakawa T. Bowtie PROPELLER: A Fast and Efficient Motion Correction Method in MRI. 19th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 12th, 2011, Montreal, Canada.

④ Moriguchi H, Urayama S, Imai Y, Honda M, Hanakawa T. Novel Partial Fourier Reconstruction Technique Using FOCUSS. 19th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 12th 2011, Montreal, Canada.

⑤ Moriguchi H, Imai Y. Improved BPE reconstruction using FOCUSS. 18th meeting of International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 5th 2010, Stockholm, Sweden.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森口央基 (MORIGUCHI HISAMOTO)
駒澤大学・医療健康科学部・教授
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：