ノート

PROPELLER T2WIにおける撮像条件の検討

後藤政実・青木茂樹¹⁾・林 直人・森 壱¹⁾・渡辺靖志
井野賢司・佐竹芳朗・西田克次・佐藤春雄
飯田恭人・美馬和男・大友 邦¹⁾

論文受付
2004年3月31日

論文受理
2004年8月13日

Code No. 261

東京大学医学部附属病院放射線部
1)東京大学医学部附属病院放射線科

緒言

PROPELLERとはperiodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstructionの省略で、radial scanとfast-spin-echo(以下FSE)の技術を合わせたものであり、Fig. 1に示したようなk-space充填法である。1TRで取得するtrajectoryはecho train length(以下ETL)により決定され、平行に配列されたtrajectoryにおける一つのまとまりをblade(またはstrip)と呼ぶ。PROPELLERは、原点近傍を通過するtrajectoryを複数回データ収集することにより、並進運動、回転運動の補正が可能となっている^{1, 2)}。

PROPELLERは、上記のように体動補正が可能な撮像法であるため、モーションアーチファクトに強いFSEという解釈で使用できる。しかし、k-space充填法

が異なる両者では同じ撮像条件に設定しても異なる画像が得られると予想され、FSEとの違いを把握する必要がある。そこで今回、PROPELLERとFSEを同一条件で撮像した際のsignal-to-noise ratio(以下SNR)と空間分解能、コントラストについての比較検討を行った。

1. 方法

1-1 使用機器

撮像装置：GE社製Signa Horizon LX 1.5T

使用コイル：circularly polarized head coil

ファントム：京都科学社製性能評価ファントム

解析装置：GE社製Advantage Workstation(以下ADW)4.0

Imaging Characteristics of PROPELLER T2-weighted Imaging

MASAMI GOTO, SHIGEKI AOKI,¹⁾ NAOTO HAYASHI, HARUSHI MORI,¹⁾ YASUSHI WATANABE, KENJI INO, YOSHIROU SATAKE, KATUJI NISHIDA, HARUO SATO, KYOUHITO IIDA, KAZUO MIMA, and KUNI OHTOMO¹⁾

Department of Radiological Technology, University of Tokyo Hospital

1)Department of Radiology, University of Tokyo Hospital

Received March 31, 2004; Revision accepted Aug. 13, 2004; Code No. 261

Summary

As the PROPELLER sequence is a combination of the radial scan and fast-spin-echo(FSE) sequence, it can be considered an FSE sequence with a motion correlation. However, there are some differences between PROPELLER and FSE owing to differences in k-space trajectory. We clarified the imaging characteristics of PROPELLER T2-weighted imaging (T2WI) for different parameters in comparison with usual FSE T2WI. When the same parameters were used, PROPELLER T2WI showed a higher signal-to-noise ratio (SNR) and lower spatial resolution than usual FSE. Effective echo time (TE) changed with different echo train lengths (ETL) or different bandwidths on PROPELLER, and imaging contrast changed accordingly to be more effective.

Key words: Magnetic resonance imaging (MRI), PROPELLER, T2-weighted imaging (T2WI), Signal-to-noise ratio (SNR), Echo time (TE)

別刷資料請求先：〒113-8655 文京区本郷7-3-1
東京大学医学部附属病院 放射線部 後藤政実 宛

1-2 SNR測定法とアーチファクト

特徴的なk-space充填法であるPROPELLERは、アーチファクトもSEなどとは大きく異なるため、SNR測定の計算方法³⁾として、以下の三つが使用可能か検討した。

1. 簡易法： $SNR_{BG}=S_I/BG_{Sd}$

2. european union法(以下EU法)： $SNR_{EU}=S_I/S_{Sd}$

3. national electrical manufactures association法(以下NEMA法)： $SNR_{NEMA}=\sqrt{2} \cdot S_{I1}/SUB_{Sd}$

S_I ：ファントム内信号強度の平均値

S_{Sd} ：ファントム内信号強度の標準偏差

BG_{Sd} ：バックグラウンドの標準偏差

S_{I1} ：同一条件で得た画像におけるファントム内信号強度の平均値

SUB_{Sd} ：差分画像におけるファントム内信号強度の標準偏差

前記した三つの方法によりPROPELLER画像のSNR評価が可能か、以下の方法で検証した。

$$SNR(2DFT) \propto dx \cdot dy \cdot dsl \cdot N_x^{1/2} \cdot N_y^{1/2} \cdot (NEX)^{1/2} \cdot (1/BW)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

dx, dy, dsl ：周波数方向，位相方向，スライス方向のvoxel径

N_x, N_y ：周波数方向，位相方向のmatrix数

NEX ：number of acquisition

BW ：band-width

slice thickness, FOVを変化させたときに得られた各画像からSNRを測定し、条件の変化と測定値の変化が(1)式に示した理論式³⁾と同様の変化を示すか検証することにより判断した。Table 1に示した撮像条件(PROPELLERの実効TEは直接設定することができず、主にmatrix, ETL, BW, NEXの設定により決定されるため表記していない)においてPROPELLER T2-weighted image(以下T2WI), FSE T2WI, SE T1WIにより性能評価ファントム均一性試験領域を撮像し、前記した三つの方法でSNRを算出した。

1-3 SNRに関する比較

両者の撮像条件が同じでもk-space充填法が異なるため、得られた画像は異なるSNRを持つことが予想される。FSE T2WIと同一条件(PROPELLERでは実効TEを直接設定できないため、両者で完全には一致していない)で撮像したPROPELLER T2WIのSNRを把握するための検討を行った。Table 1に示した撮像条件(ただし、FOV 30cm, ETL 16, slice thickness 10mmとした)からmatrix(128, 192, 256), NEX(2, 4)を変化させた6種類の撮像条件において性能評価ファントム均一性試験領域を撮像し、NEMA法を用いたSNR測定に

Fig. 1 PROPELLER sequence k-space trajectory.

よりPROPELLER T2WIとFSE T2WIのSNRを比較した。

1-4 空間分解能に関する比較

両者の撮像条件が同じでもk-space充填法が異なるため、得られた画像は異なる空間分解能を持つことが予想される。FSE T2WIと同一条件で撮像したPROPELLER T2WIの空間分解能を把握するための検討を行った。Table 1に示した撮像条件(ただし、FOV 30cm, ETL 16, slice thickness 10mmとした)からmatrix(128, 256), NEX(2, 4)を変化させた4種類の撮像条件において性能評価ファントム空間分解能試験領域を撮像し、得られた画像を視覚的に比較した。比較方法は、同一条件にて得られた両者の画像をADW画面に並べ、空間分解能が高いと思われる方を1点、低い方を0点とし、10名にて4組の画像を評価した。

1-5 ETL, BWを変化させたときのコントラストに関する比較

PROPELLER T2WIではすべてのtrajectoryがk-spaceの中心付近に存在するため、ETLやBWが変化することによりコントラストが大きく影響されると予想される。そこで、PROPELLER T2WIのコントラストを把握するため、ETL, BWを変化させたときの実効TE, コントラストへの影響を検証した。Table 2に示した撮像条件(すべてスライス間隔1.5mmのマルチスライスにて撮像した)においてボランティアを撮像し、Fig. 2に示した位置に関心領域(以下ROI)を置き、測定したコントラスト[白質(以下WM)/脳脊髄液(以下CSF), 灰白質(以下GM)/CSF]をFSE T2WIと比較した。

Table 1 Imaging parameters.

	PROPELLER T2WI	FSE T2WI	SE T1WI
TR (ms)	4000	4000	500
(effective) TE (ms)		100	12
BW (kHz)	31	31	31
ETL	24	24	
slice thickness (mm)	2~20	2~20	2~20
FOV (cm)	16~48	20~48	24~48
matrix size	192×192	192×192	192×192
number of acquisition	2	2	2

Table 2 Imaging parameters.

	PROPELLER T2WI	FSE T2WI
TR (ms)	4000	4000
effective TE (ms)		100
BW (kHz)	15~62	31
ETL	8~48	24
slice thickness (mm)	5	5
FOV (cm)	24	24
matrix size	256×256	256×256
number of acquisition	2	2

2. 結果

2-1 SNR測定法とアーチファクト

簡易法ではストリークアーチファクト (Fig. 3) が影響し、測定する際のROIの位置で BG_{Sd} が大きく変化するため、同じ画像のSNRであっても再現性を持って測定することができなかった。

EU法ではリングアーチファクト (Fig. 4) が S_{Sd} に影響し、SNR測定法としては不適切であった。

NEMA法にて測定した結果をFig. 5 (FOV 28cmを1とし規格化した)、Fig. 6 (slice thickness 8mmを1とし規格化した) に示した。FOVを変化させた場合、slice thicknessを変化させた場合ともに、(1)式から求めた理論値と一致し、PROPELLERのSNR測定法として有効であると判断した。

2-2 SNRに関する比較

FSE T2WI (matrix 192, NEX 2) のSNRを1とし規格化した測定結果をFig. 7に示す。六つの撮像条件すべてにおいて、FSE T2WIに比較しPROPELLER T2WIの方が約1.5~2倍高いSNRであった。

2-3 空間分解能に関する比較

撮像した画像をFig. 8に示した。四つの撮像条件すべてにおいて、FSE T2WI 10点、PROPELLER T2WI 0点となり、PROPELLER T2WIの方が低い空間分解能となる評価結果であった。

Fig. 2 Region of interest position.

Fig. 3 PROPELLER T2WI shows streak artifacts.

2-4 ETLを変化させたときのコントラストに関する比較

ETLを変化させたときの有効TEの変化をFig. 9に示した。ETLが大きくなるにつれ有効TEは直線的に大き

Fig. 4 PROPELLER T2WI shows ring artifacts.

Fig. 5 Relationship between FOV and SNR ratio.

Fig. 6 Relationship between slice thickness and SNR ratio.

Fig. 7 Relationship between matrix/NEX and SNR ratio.

Fig. 8 Images of space resolution phantom.
(a) Images of FSE T2WI.
(b) Images of PROPELLER T2WI.

a

b

Fig. 9 Relationship between effective TE and ETL.

くなり、その直線の傾きはBWが狭いほど強くなった。

15kHz, 31kHz, 62kHz(BWはGE社の表記にしたがい±○○kHz表記とした)にBWを一定とし、ETLを変化させたときのコントラスト測定値の変化をFig. 10, ボランティア画像をFig. 11に示した。Fig. 10の結果が示すように、ETLが大きくなるにつれコントラストは指数関数的に減少し、15kHzでETL 16のとき、31kHz/ETL 24, 62kHz/ETL 32のときに、WMとCSF, GMとCSFのコントラストがFSE T2WI(実効TE 100msec)のそれと同程度となった。

3. 考察

SNR測定用の画像をアーチファクトが少ない状態で得ることができなかったため、バックグラウンドの標準偏差、ファントム内信号強度の標準偏差の項がある

Fig. 10 Relationship between contrast and ETL for FSE T2WI and PROPELLER T2WI (BW 15~62 kHz).

簡易法、EU法はPROPELLERのSNR測定に適さない計算方法であった。

これに対し、NEMA法は理論値に近い測定結果を得ることができたのでPROPELLERのSNR測定法として使用することが可能である。NEMA法のみSNR測定が可能となった理由としては、ファントム内に存在する

Fig. 11 ETL changed images for PROPELLER T2WI (BW 15kHz, ETL 12~48) and FSE T2WI (TE 100 msec).

アーチファクトがFOVを変化させない限り同一部位に生じるため、差分することによりファントム内信号強度にアーチファクトの影響がほぼなくなったためと考えられる。PROPELLER特有のアーチファクト発生原因としては、斜めに配列されたtrajectoryを平行配列のk-spaceにグリッティングする過程によるものと推察される。

PROPELLER T2WIとFSE T2WIを同じ撮像条件とすると、サンプリングデータ数は同じであるにもかかわらずSNRはPROPELLER T2WIの方が高く、空間分解能はFSE T2WIの方が高い結果であった。k-spaceにはコントラストに強く影響する領域(以下C領域)と空間分解能に強く影響する領域(以下S領域)があり⁴⁾、両者のk-space充填法を見ることにより、この結果は説明できる。FSEではサンプリングされたデータは、k-space内のC領域とS領域に同じ密度で充填されているのに対し、PROPELLERではC領域の密度が高くS領域の密度が低くなっている。そのため、サンプリングデータ数が同じであれば、SNR・空間分解能の異なる画像となる。また、NEX (FSEではNEXを増加させると同じデータを積算するのに対し、PROPELLERでは角度の異なるbladeが $ETL \times \text{blade数} = \text{matrix} \times \text{NEX}$ の関係⁵⁾で増加する)を増加させblade数が増加することにより、k-space内サンプリング密度が高くなるPROPELLERにおいては、NEXの増加による空間分解能向上が期待されたが、今回の視覚的評価では確認するこ

とができなかった。

PROPELLER T2WIにおいて、ETLを増やす、またはBWを狭くすると、blade採取の中央の時点となる実効TE⁵⁾は長くなる結果であった。この結果もPROPELLERのk-space充填法による特徴を表している。今回使用した装置のFSEでは、k-space中心部分へ設定TEのデータを充填し、設定TEから遠いTEのデータは中心から離れた部分へ充填するので、ETLを変化させても実効TEは同じになる。また、BWを変更した際にも設定TEに近いデータをk-space中心に充填する。しかし、PROPELLERでは、ETLを増すことによりTEの短いデータから長いデータのすべてがk-space中心部に存在すること、BWを狭くすることによりリードアウトにかかる時間が延びてしまう⁶⁾ことによりFig. 9のように実効TEが変化した。したがって、画像補正を行う際に必要となるETL数を確保(移動補正を行うための画像における空間分解能の確保⁷⁾)しなければならないPROPELLERでは、T1WIとなる短い時間に実効TEを現在では設定できない。PROPELLER T2WI (BW 15kHz)においてFSE T2WI (Table 2の撮像条件)と同程度の実効TEとなるのはETL 16 (Fig. 9)であり、ボランティア画像におけるコントラスト測定の結果からも同程度のコントラストとなるのはETL 16 (Fig. 10)であった。このことから、FSE画像に表示されるTEとPROPELLER画像に表示されるTEを合わせることで同程度のコントラストを持った画像を得ることが可

能であった。撮像中静止していることが困難な患者に用いられることを前提とすると、PROPELLER T2WIの撮像条件としては、TR:4000ms, TE:95ms, BW:31kHz, ETL:24, matrix size:192, number of acquisition:1.5, FOV:24cm, slice thickness:5mmが適当と考えた。

4. 結 語

FSEの実効TEとは異なり、PROPELLERの実効TEはETLとBWにより大きく変化するが、両者の実効TEを同じにすることで近いコントラストの画像を得ることができた。また、同一条件で得られた両者の画像は、PROPELLER画像のSNRが高く空間分解能が低い傾向であった。PROPELLERを用いて撮像する際には、前述したような傾向を把握し撮像条件を設定する

必要がある。また、グリッティングが原因と考えられるアーチファクト低減の技術開発が必要と考えられる。

謝 辞

MR研究を進めるにあたり、日頃からご指導をいただいている東京大学放射線科の先生方や放射線部技師諸兄、GE横河メディカルシステム株式会社の桃沢宏之様にこの場を借りて深謝いたします。

なお、本論文の要旨は、2003年4月日本放射線技術学会第59回総会学術大会(横浜)、2002年10月日本放射線技術学会第30回秋季学術大会(松江)において発表した。

参考文献

- 1) Pipe JG: Motion correction with PROPELLER MRI: application to head motion and free-breathing cardiac imaging. Magn Reson Med, 42, 963-969, (1999).
- 2) Pipe JG, Farthing VG, and Forbes KP: Multishot diffusion-weighted FSE using PROPELLER MRI. Magn Reson Med, 47, 42-52, (2002).
- 3) 中村 實, 金森勇雄: MR検査の実践. pp.90-92, 医療科学社, 東京, (2000).
- 4) 室伊三男: 基礎講座MRシリーズ-k空間(k-space)の特徴一. 日放技学誌, 59(7), 799-803, (2003).
- 5) 森 壘, 青木茂樹, 阿部 修, 他: PROPELLER MRIの基礎的検討および臨床応用. 日本医放会誌, 62(6), 287-289, (2002).
- 6) 錦 成郎: 基礎講座MRシリーズ-シーケンステーブルを読む一. 日放技学誌, 59(6), 707-718, (2003).
- 7) 室伊三男, 堀江朋彦, 木村絵里, 他: PROPELLER法におけるEcho Train LengthとBlade数が動きの補正に与える影響について(コンピュータシミュレーション). 日放技学誌, 60(2), 264-269, (2004).

図表の説明

- Fig. 1 PROPELLERのk-space充填法
Fig. 2 ボランティア画像におけるROIの位置
Fig. 3 PROPELLER T2WIのストリークアーチファクト
Fig. 4 PROPELLER T2WIのリングアーチファクト
Fig. 5 FOVとSNR比の関係
Fig. 6 スライス厚とSNR比の関係
Fig. 7 matrix/NEXとSNR比の関係
Fig. 8 空間分解能ファントムの画像
(a)FSE T2WIで撮像した画像
(b)PROPELLER T2WIで撮像した画像
Fig. 9 ETLと実効TEの関係
Fig. 10 FSE T2WIとPROPELLER T2WI(BW 15~62kHz)におけるETLとコントラストの関係
Fig. 11 FSE T2WI(TE 100msec)とPROPELLER T2WIにおいてETLを変化(BW 15kHz, ETL12~48)させたボランティア画像

Table 1 各シーケンスの撮像条件

Table 2 各シーケンスの撮像条件