

連続講座

断層映像法の基礎 第18回
PROPELLER MRI篠原 広行¹⁾・妹尾 淳史¹⁾・橋本 雄幸²⁾¹⁾首都大学東京健康福祉学部 放射線学科²⁾横浜創英短期大学 情報処理科

はじめに

第12回と第15回において、MRIの計測中に被写体が動いたときに生じるモーションアーチファクトを取り上げた。ここでは、データを収集しているときに被写体が動くと、計測データにどのような影響が出るか、また、再構成像にどのようなアーチファクトとして出るのかを、数式と計算機シミュレーションで示した。

今回は、モーションアーチファクトを補正する有効な方法として注目を浴びているPROPELLER MRIについて、その原理の解説を行い、動きの補正方法を、計算機シミュレーションを用いて示す。

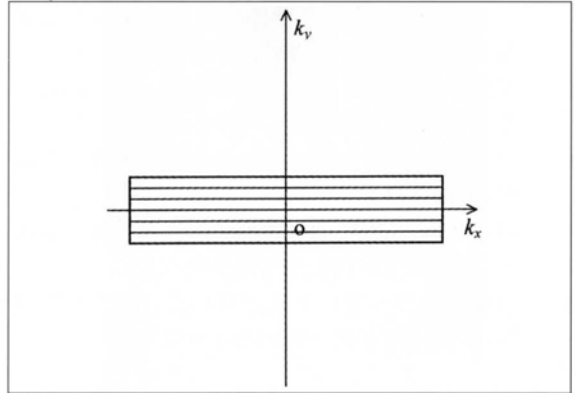


図1 k空間のデータを高速スピネコー法で帯状に取得する。このデータ領域をブレイドと呼ぶ。

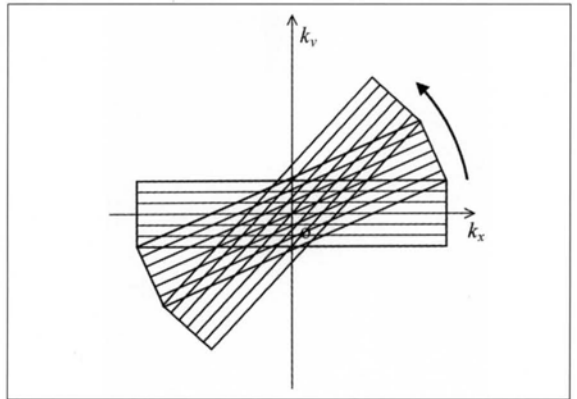


図2 ブレイドを回転させながらデータを取得していく。

1. PROPELLER MRIの原理
2. 1点画像のシミュレーション
3. 1点画像の動きの補正
4. ファントムを用いたシミュレーションと補正

1. PROPELLER MRIの原理

PROPELLER (Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction) MRIは、高速スピネコー法による帯状領域の取得と、それを繰り返し時間TRごとに回転して、k空間を埋めていくという2つのステップによってデータを取得する方法である。図1に示すように、高速スピネコー法で帯状にk空間のデータを取得する。この帯状のデータ領域をブレイド (blade) と呼ぶ。さらに、図2に示すように、そのブレイドを回転して取得していき、図3に示すようにk空間のデータをすべて埋める。k空間のデータがすべて取得できれば、2次元フーリエ逆変換を用いて原画像を再構成できる。その際、取得したデータは格子状に並んでいないので、補間を用いて格子状に変換する必要がある。原点付近ではデータの重複があり、このデータの重複を利

用することにより、動きの補正が可能となる。

このPROPELLER MRIにおけるデータ収集で起きる動きによるアーチファクトには、2種類のアーチファクトが考えられる。1つは、1つのブレイドと次のブレイドの計測の間に起こる動きに起因したアーチファクトで、これをタイプIアーチファクトと呼

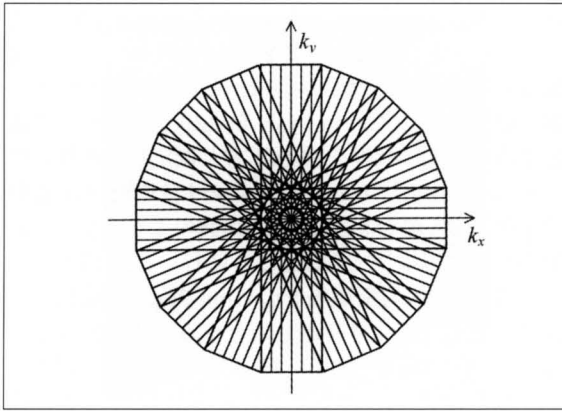


図3 ブレードがk空間を埋め尽くしたところ。重複した領域はあるが、このデータから2次元フーリエ逆変換で再構成できる。

ぶ。もう1つは、1つのブレードを計測する間の動きに起因したアーチファクトで、これをタイプIIアーチファクトと呼ぶ。このデータ収集においては両方のアーチファクトを補正することができる。今回は、タイプIのアーチファクトがどのように発生して、どのように補正できるかを、計算機シミュレーションを用いて行う。

高速スピネコー法での1つめのブレードの計測は、以下ようになる。実部の値と虚部の値は分けて計測するので、 (x_0, y_0) に水素原子が強度 S_0 に相当する量だけ存在する場合、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x_0 t + G_p y_0 t_p)] \quad (1)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x_0 t + G_p y_0 t_p)] \quad (2)$$

となる。ここで、 $S_{re}(t)$ は実部の計測データで、 $S_{im}(t)$ は虚部の計測データである。また、 γ は磁気回転比、 G_r および G_p は、それぞれ読み出し (read out) 方向および位相エンコード (phase encode) 方向へ印加する線形勾配磁場の強度を表している。1つめのブレードでは、読み出し方向はx方向に相当し、位相エンコード方向はy方向に相当する。 t_p は、位相エンコード方向へ線形勾配磁場を印加する時間を表している。この式では、緩和を考えていない。

2番目のブレードの計測は、ブレードを回転して計測するので、その回転角を θ とすると、水素原子核の1点 (x_0, y_0) が、

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \\ y_1 = -x_0 \sin \theta + y_0 \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

に回転して計測したものと等しくなる。よって、計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x_1 t + G_p y_1 t_p)] \quad (4)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x_1 t + G_p y_1 t_p)] \quad (5)$$

となる。同様に、n番目のブレードの計測は、水素原子核の1点 (x_0, y_0) が $n\theta$ 回転したことに相当するので、

$$\begin{cases} x_n = x_0 \cos n\theta + y_0 \sin n\theta \\ y_n = -x_0 \sin n\theta + y_0 \cos n\theta \end{cases} \quad (6)$$

となり、計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x_n t + G_p y_n t_p)] \quad (7)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x_n t + G_p y_n t_p)] \quad (8)$$

となる。

まずはブレード間の平行移動の動きについて考える。繰り返し時間TRの間に水素原子核の1点 (x_0, y_0) が速度 (v_x, v_y) で等速に動いたとすると、2番目のブレードを計測する時点での水素原子核の位置 (x'_0, y'_0) は、

$$\begin{cases} x'_0 = x_0 + v_x \cdot TR \\ y'_0 = y_0 + v_y \cdot TR \end{cases} \quad (9)$$

となる。また、同様に等速で動いているとするとn番目のブレードでの水素原子核の位置は、

$$\begin{cases} x'_{n0} = x_0 + n v_x \cdot TR \\ y'_{n0} = y_0 + n v_y \cdot TR \end{cases} \quad (10)$$

となる。よって、動きが加わったn番目のブレードの計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x'_{n0} t + G_p y'_{n0} t_p)] \quad (11)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x'_{n0} t + G_p y'_{n0} t_p)] \quad (12)$$

となる。ここで、

$$\begin{cases} x'_n = x'_{n0} \cos n\theta + y'_{n0} \sin n\theta \\ y'_n = -x'_{n0} \sin n\theta + y'_{n0} \cos n\theta \end{cases} \quad (13)$$

である。

次にブレード間の回転移動の動きについて考える。繰り返し時間TRの間に水素原子核の1点 (x_0, y_0) が原点に対し角速度 v_θ で等速に動いたとすると、2番目のブレードを計測する時点での水素原子核の位置 (x''_0, y''_0) は、

$$\begin{cases} x''_0 = x_0 \cos(v_\theta \cdot TR) + y_0 \sin(v_\theta \cdot TR) \\ y''_0 = -x_0 \sin(v_\theta \cdot TR) + y_0 \cos(v_\theta \cdot TR) \end{cases} \quad (14)$$

となる。また、同様に等速で回転したとするとn番目のブレードでの水素原子核の位置は、

$$\begin{cases} x''_{n0} = x_0 \cos(n v_\theta \cdot TR) + y_0 \sin(n v_\theta \cdot TR) \\ y''_{n0} = -x_0 \sin(n v_\theta \cdot TR) + y_0 \cos(n v_\theta \cdot TR) \end{cases} \quad (15)$$

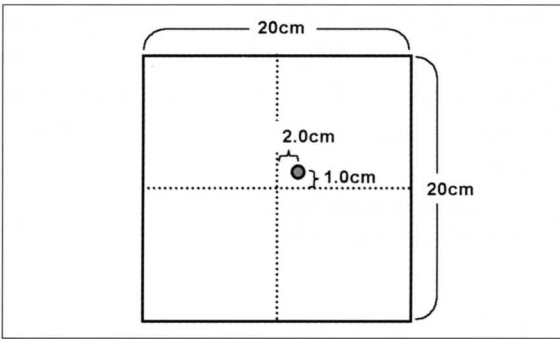


図4 画像上で、水素原子が存在する点を示している。画像の大きさは20cm正方形で、水素原子は、(2.0cm, 1.0cm) の位置にある。

となる。よって、回転が加わったn番目のブレイドの計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x''_n t + G_p y''_n t_p)] \quad (16)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x''_n t + G_p y''_n t_p)] \quad (17)$$

となる。ここで、

$$\begin{cases} x''_n = x''_{n0} \cos n\theta + y''_{n0} \sin n\theta \\ y''_n = -x''_{n0} \sin n\theta + y''_{n0} \cos n\theta \end{cases} \quad (18)$$

である。また、(15)式より(18)式は、

$$\begin{cases} x''_n = x_0 \cos[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] + y_0 \sin[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] \\ y''_n = -x_0 \sin[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] + y_0 \cos[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] \end{cases} \quad (19)$$

となる。

2. 1点画像のシミュレーション

前節に述べたモーションアーチファクトを含んだ計測に実際の値を当てはめて、シミュレーションを

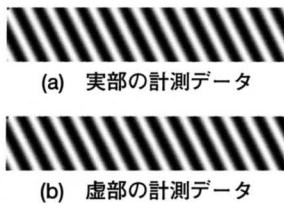


図5 1つ目のブレイドの計測データ

行う。磁気回転比 γ は水素原子核の場合42.58MHz/T (テスラ) で、静磁場強度を1T (テスラ) とし、勾配磁場 G_r を0.12G (ガウス) /cmとする。水素原子の信号強度 S_0 は1とし、 (x_0, y_0) を(20cm, 1.0cm) に設定する。画像の視野を20cm正方形と仮定し、画像の中心から(2.0cm, 1.0cm) のところに1点だけ水素原子が存在する場合を図で表すと図4のようになる。計測のサンプリングを0.1msごとに行い、位相エンコードのy方向の勾配磁場を $t_p=1ms$ で G_p を0.012G (ガウス) ごとに変化させるものとする。また繰り返し時間 $TR=1000ms$ とする。読み出し方向のサンプリング数を128とし、ブレイドの数を8個とすると、位相エンコードの数は、

$$\begin{aligned} & \text{[位相エンコードの数]} \times \text{[ブレイド数]} = \\ & \text{[読み出し方向のサンプリング数]} \times \pi / 2 \end{aligned} \quad (20)$$

の式より求まり、約25となる。

1つ目のブレイドの計測は、

$$\begin{aligned} s_{re}(k, m) &= \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 2.0 \times k \times 10^{-4} \\ & \quad + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 10^{-3})] \\ s_{im}(k, m) &= -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 2.0 \times k \times 10^{-4} \\ & \quad + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 10^{-3})] \end{aligned} \quad (21)$$

となる。ここで、kはサンプリング点を表し、-64から計測数63までの整数値をとり、mは位相エンコードの度合いを表し、-12から12までの整数値をとる。被写体に動きがない場合の2つ目以降のブレイドの計測は、水素原子の存在する座標点を

$$\begin{cases} x_n = 2.0 \cos(n\pi/8) + 1.0 \sin(n\pi/8) \\ y_n = -2.0 \sin(n\pi/8) + 1.0 \cos(n\pi/8) \end{cases} \quad (22)$$

として、(21)式の2.0と1.0の部分をそれぞれ x_n と y_n

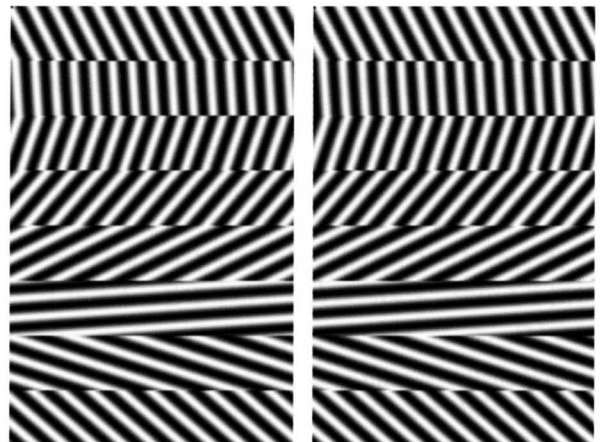
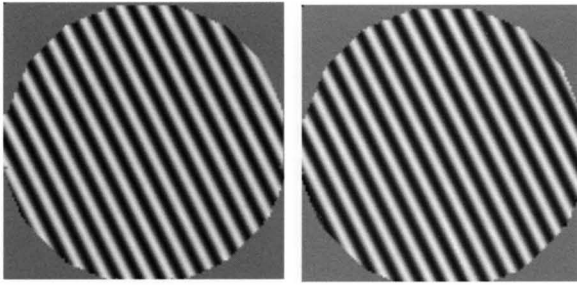


図6 8個すべてのブレイドの計測データを縦に並べた画像

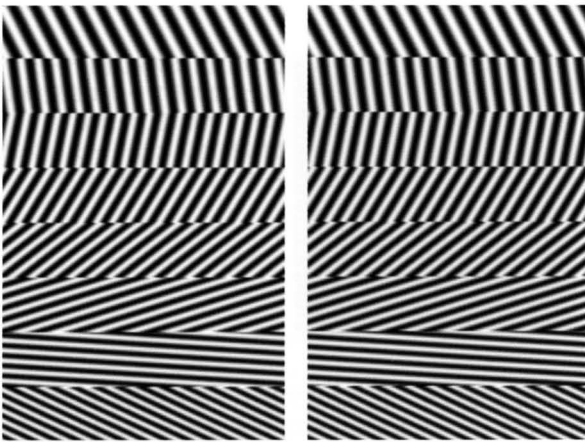
図6 8個すべてのブレイドの計測データを縦に並べた画像



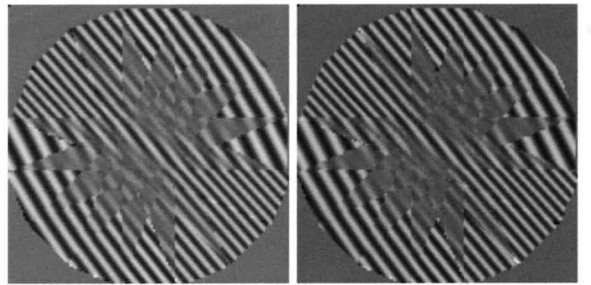
(a) 実部のk空間データ (b) 虚部のk空間データ
図7 ブレードをk空間上に変換して並べ替えた画像



図8 図7のk空間データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像



(a) 実部の計測データ (b) 虚部の計測データ
図9 ブレード間で $v_x=0.2\text{cm/s}$, $v_y=0.3\text{cm/s}$ の等速の平行移動を考えた場合の各ブレードの計測データ



(a) 実部のk空間データ (b) 虚部のk空間データ
図10 図9の計測データをもとにk空間に並べ替えて平均を取った画像

の値に置き換えて求める。1つ目のブレードの計測を図5に、8個のブレードの計測を並べたものを図6に示す。8個のブレードをk空間に並べたものを図7に示す。それぞれ(a)が実部で、(b)が虚部である。図7に示したデータからk空間の格子状に変換して2次元フーリエ逆変換を用いて再構成を行った画像を図8に示す。

これらの計測に $v_x=0.2\text{cm/s}$, $v_y=0.3\text{cm/s}$ の等速の平行移動を考える。すると、(22)式は、

$$\begin{cases} x_n = (2.0 + 0.2n) \cos(n\pi/8) + (1.0 + 0.3n) \sin(n\pi/8) \\ y_n = -(2.0 + 0.2n) \sin(n\pi/8) + (1.0 + 0.3n) \cos(n\pi/8) \end{cases} \quad (23)$$

となる。この場合、8個のブレードの計測を順に並べたものを図9に示す。また、k空間に並べ替えて平均を取ったものを図10に、そこから再構成したものを図11に示す。再構成画像には、等速運動の動きに沿ったアーチファクトと、ブレードの位相エンコード方向に沿った直線上のアーチファクトが見られる。

また、 $v_\theta=3.0^\circ/\text{s}$ の角速度で回転した場合を考える。すると、(22)式は、

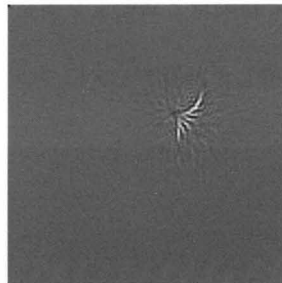


図11 図10のk空間データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像
平行移動によるモーションアーチファクトが見られる。

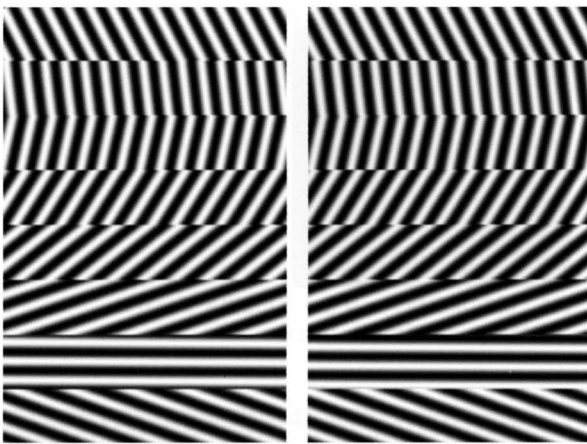
$$\begin{cases} x_n = 2.0\cos(n\pi/8+3.0n\pi/180) + 1.0\sin(n\pi/8+3.0n\pi/180) \\ y_n = -2.0\sin(n\pi/8+3.0n\pi/180) + 1.0\cos(n\pi/8+3.0n\pi/180) \end{cases} \quad (24)$$

となる。この場合、8個のブレードの計測を順に並べたものを図12に示す。また、k空間に並べ替えて平均を取ったものを図13に、そこから再構成したものを図14に示す。再構成画像には円弧状のアーチファクトが見られる。

3. 1点画像の動きの補正

タイプIの動きの補正は、以下の手順で行う。

- ① 各ブレードをk空間に配置する。
- ② 単一のブレードから2次元フーリエ逆変換で画像を再構成する。

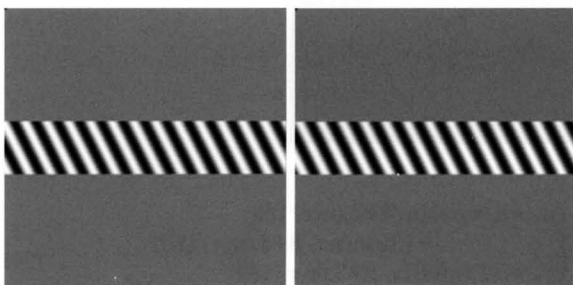


(a) 実部の計測データ (b) 虚部の計測データ

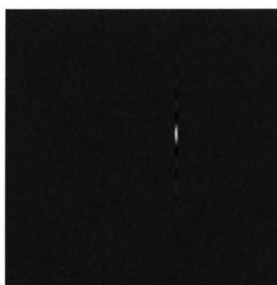
図12 ブレード間で $v_{\theta}=3.0^{\circ}/s$ の角速度の回転を考えた場合の各ブレードの計測データ

- ③ 最初のブレードを基準にし、各ブレードとの相互相関を計算する。
- ④ 平行移動の場合、相関の高い値の座標が移動値になる。
- ⑤ 回転移動の場合、再構成画像を回転し、相関値の最も高い回転角を回転量とする。
- ⑥ それぞれのブレードで移動量と回転量を補正して、再構成し直す。

1点画像を(23)式で平行移動した計測データについて

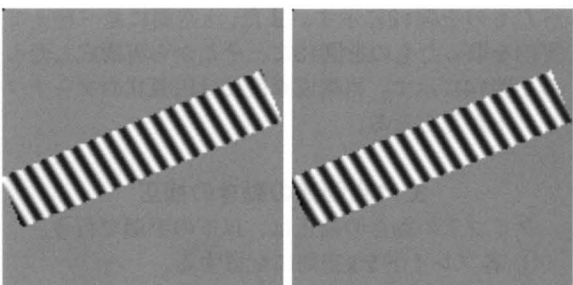


(a) 実部の計測データ (b) 虚部の計測データ

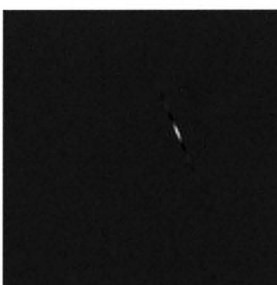


(c) 1つ目のブレードのみから再構成した画像

図15 平行移動の計測データにおいて、1つ目のブレードをk空間に配置した画像とそこから2次元フーリエ逆変換で再構成した画像

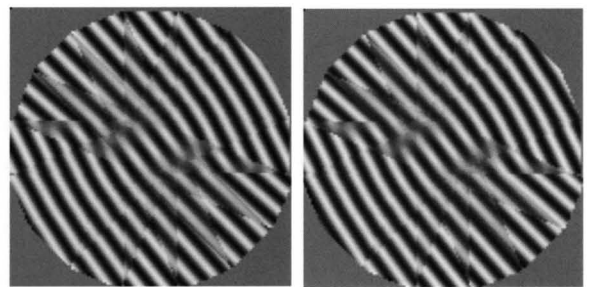


(a) 実部の計測データ (b) 虚部の計測データ



(c) 2つ目のブレードのみから再構成した画像

図16 平行移動の計測データにおいて、2つ目のブレードをk空間に配置した画像とそこから2次元フーリエ逆変換で再構成した画像



(a) 実部のk空間データ (b) 虚部のk空間データ

図13 図12の計測データをもとにk空間に並べ替えて平均を取った画像

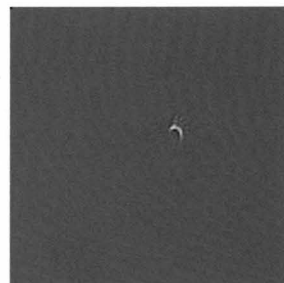


図14 図13のk空間データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像
回転移動によるモーションアーチファクトが見られる。

て補正を行う。1つ目のブレードをk空間に配置した画像とそこから2次元フーリエ逆変換で再構成した画像を図15に示す。また、2つ目のブレードをk空間に配置した画像とその再構成画像を図16に示す。2

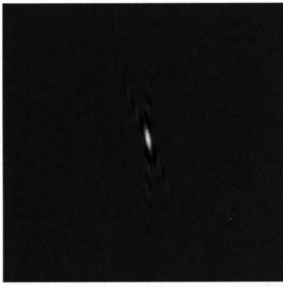
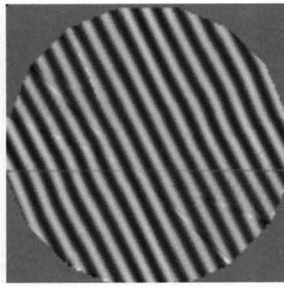
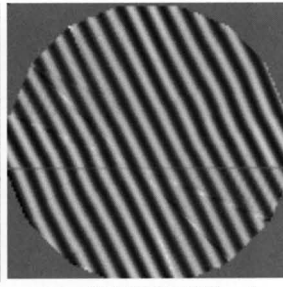


図17 1つ目のブレードと2つ目のブレードを再構成した画像の相互相関画像



(a) 実部のk空間データ



(b) 虚部のk空間データ

図18 相関画像から各ブレードの移動値を求めて、それを補正してからk空間に再配置した画像

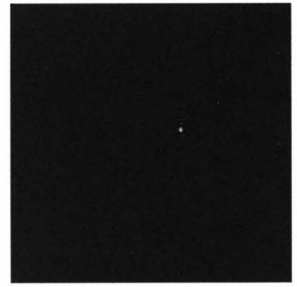
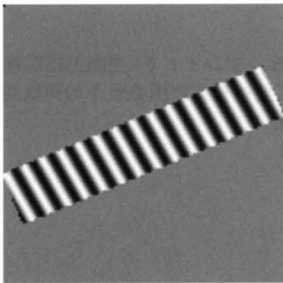
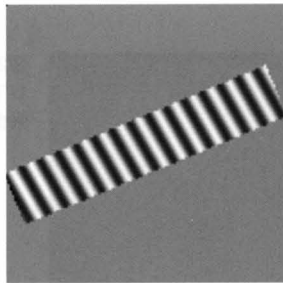


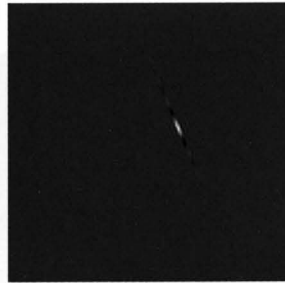
図19 図18のk空間データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像。平行移動によるモーションアーチファクトが消失している。



(a) 実部の計測データ

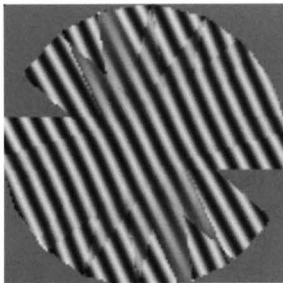


(b) 虚部の計測データ

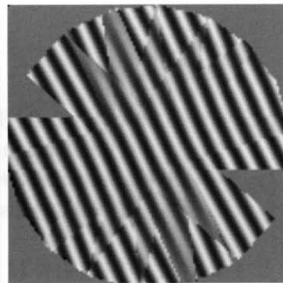


(c) 2つ目のブレードのみから再構成した画像

図20 回転移動の計測データにおいて、2つ目のブレードをk空間に配置した画像とそこから2次元フーリエ逆変換で再構成した画像



(a) 実部のk空間データ



(b) 虚部のk空間データ

図21 回転して相関をとり、相関値が最も高いところから回転量を推定して、それを補正してからk空間に再配置した画像。隙間が空いている。

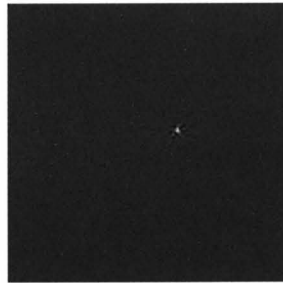


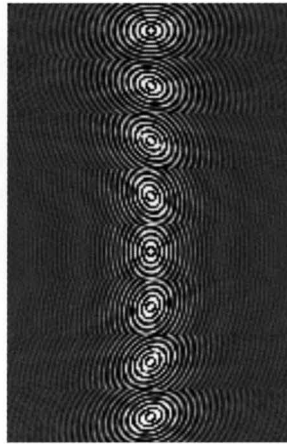
図22 図21のk空間データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像。回転移動によるモーションアーチファクトが消失している。

つのブレードの相互相関を計算すると、画像の座標(65,62)にピークが見られる。よって、x方向に+1、y方向に(画像では逆になるので)+2移動していることになる。実際にはx方向に+1.28、y方向に+1.92となるのでほぼ合っていると見える。その相関の画像を図17に示す。1つ目のブレードとの相関から各ブレードにおける移動を補正してフーリエ空間に戻して再配置した画像を図18に示す。それをもとに再構成した画像を図19に示す。図11で顕著に現れていたモーションアーチファクトが図19では消えている。

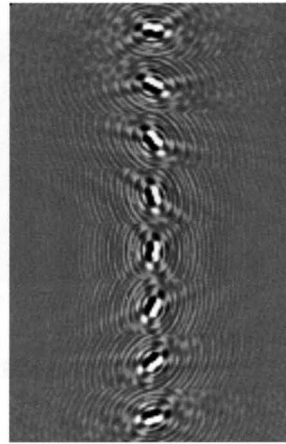
次に1点画像を(24)式で回転移動した計測データについて補正を行う。1点画像の場合は、回転移動は平行移動と区別がつかないが、ここでは回転移動のみが起こったとし、回転移動の補正を行う。1つ目のブレードは移動が何も起こっていないので平行移動の場合と等しく、図15に示したとおりである。2つ目のブレードをk空間に配置した画像とその再構成画像を図20に示す。回転量を算出する場合、片方の再構成画像を回転しながら相関をとり、相関が最大になるところを回転量と推定する。推定した回転



図23 数値ファントムの画像

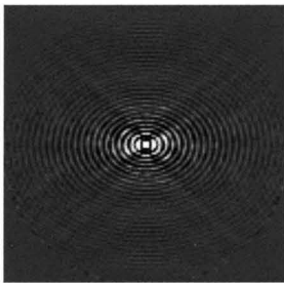


(a) 実部の計測データ

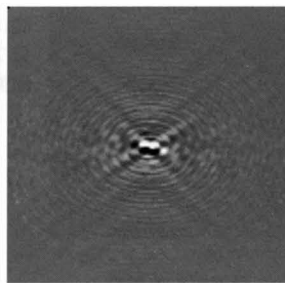


(b) 虚部の計測データ

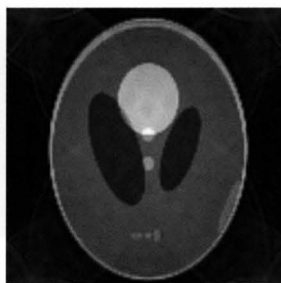
図24 数値ファントムを PROPELLER MRIで撮像したときの全ブレイドの計測データ
ブレイドは全部で8枚からなっている。



(a) 実部のk空間データ



(b) 虚部のk空間データ



(c) k空間データから再構成した画像

図25 ブレイドをk空間上に変換して並べ替えた画像とその再構成画像

量をもとに、各ブレイドの回転を補正してフーリエ空間で再配置した画像を図21に示す。回転は、フーリエ空間でもそのまま回転となるので、補正した分ブレイドが回転し、k空間に隙間が生じる。回転を補正する場合、隙間が生じるのは避けられない。隙間をそのままにして再構成した画像を図22に示す。図14で見られた円弧状のアーチファクトは消失している。

4. ファントムを用いたシミュレーションと補正

PROPELLER MRIのモーションアーチファクトを数値ファントムで再現する。使用した数値ファントムの形状を図23に示す。画素数は128×128で、1辺は20cmとする。動きのない場合の計測データを図24に示す。また、各ブレイドをk空間に並べ替えた画像とその再構成画像を図25に示す。

計測中にファントム全体が平行移動と回転移動をするものとする。その動きは、(23)式と(24)式を合わせて、

$$\begin{cases} x_n = (x+0.2n)\cos(n\pi/8+3.0n\pi/180) \\ \quad + (y+0.3n)\sin(n\pi/8+3.0n\pi/180) \\ y_n = -(x+0.2n)\sin(n\pi/8+3.0n\pi/180) \\ \quad + (y+0.3n)\cos(n\pi/8+3.0n\pi/180) \end{cases} \quad (25)$$

とする。その他の条件は、前節と同じとする。(25)式の動きが加わった計測データを図26に示す。また、補正しないまま各ブレイドをk空間に並べ替えた画像とその再構成画像を図27に示す。再構成画像は動きによって非常にぶれているのが分かる。

この計測データから1点画像を補正した方法を用いて回転移動の補正をし、次に平行移動の補正をする。補正を施したk空間の画像と再構成画像を図28に示す。図28の再構成画像は、図27に示した再構成画像よりアーチファクトが軽減されている。

謝辞：本稿で使用したプログラムの開発は、平成17年度東京都立の大学における傾斜的配分研究費「MRIにおける3次元的な動きによる画質劣化を補正する画像再構成法の開発」によるものである。

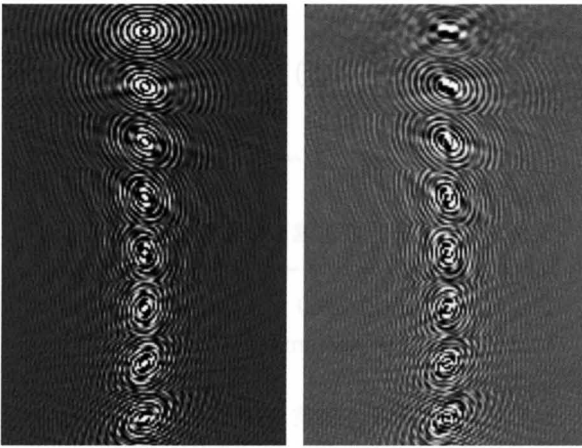


図26 数値ファントムのデータにブレイド間で $v_x=0.2\text{cm/s}$, $v_y=0.3\text{cm/s}$ の等速の平行移動と $v_\theta = 3.0^\circ/\text{s}$ の角速度の回転を考えた場合の各ブレイドの計測データ

(a) 実部の計測データ

(b) 虚部の計測データ

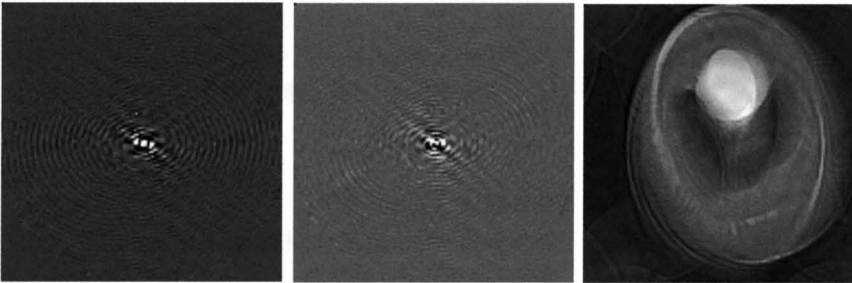


図27 ブレイドをk空間上に変換して並べ替えた画像とその再構成画像 再構成画像には、平行移動と回転移動のアーチファクトが混ざって現れている。

(a) 実部のk空間データ

(b) 虚部のk空間データ

(c) k空間データから再構成した画像

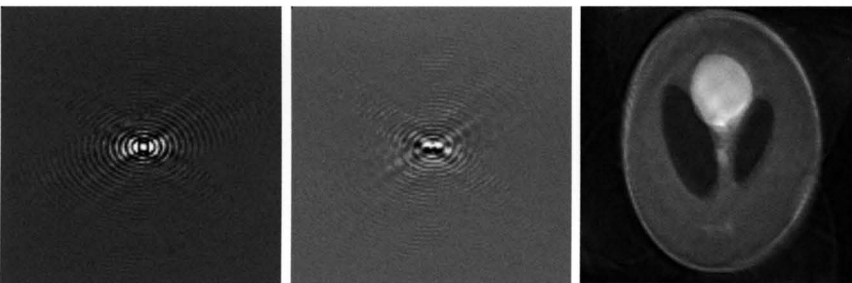


図28 k空間上で動きの補正をしたデータとその再構成画像 再構成画像では、モーションアーチファクトが軽減されている。

(a) 実部のk空間データ

(b) 虚部のk空間データ

(c) k空間データから再構成した画像

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619