

第12章 PROPELLER MRI

第8章において、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とり上げた。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、再構成画像にどのようなアーチファクトとして出るのであるかを、数式と計算機シミュレーションで示した。

本章では、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で示す。

〔第1節〕 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12-1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12-2に示すように、そのブレイドを回転して取得していき、図12-3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、補間を用いて格子上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かかる動きに起因したアーチファクトで、これをタイプ A アーチファクトと呼ぶ。もう1つは、1つのブレイ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 B 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。本章では、タイプ B 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つ目のブレイドの計測は、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、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x_0 t + G_p y_0 t_p)] \quad (12-1)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x_0 t + G_p y_0 t_p)] \quad (12-2)$$

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

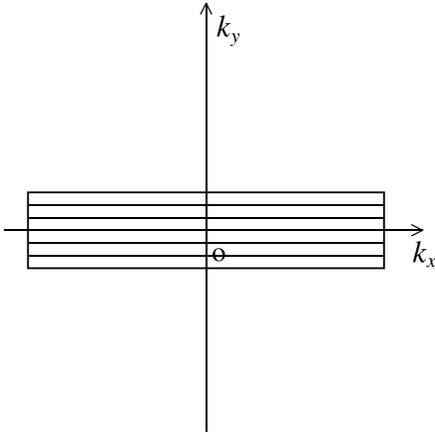


図 12-1

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．

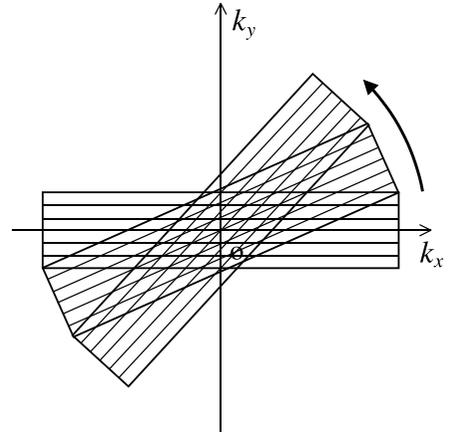


図 12-2

ブレイドを回転させながらデータを取得していく．

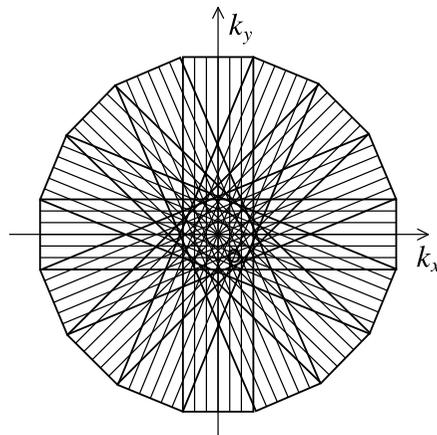


図 12-3 ブレイドが k 空間を埋め尽くしたところ
重複した領域はあるが、このデータから2次元フーリエ逆変換で再構成できる．

向へ印加する線形勾配磁場の強度を表している．1つ目のブレイドでは、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番目のブレイドの計測は、ブレイ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、

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \\ y_1 = -x_0 \sin \theta + y_0 \cos \theta \end{cases} \quad (12-3)$$

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、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x_1 t + G_p y_1 t_p)] \quad (12-4)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x_1 t + G_p y_1 t_p)] \quad (12-5)$$

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

$$\begin{cases} x_n = x_0 \cos n\theta + y_0 \sin n\theta \\ y_n = -x_0 \sin n\theta + y_0 \cos n\theta \end{cases} \quad (12-6)$$

となり、計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x_n t + G_p y_n t_p)] \quad (12-7)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x_n t + G_p y_n t_p)] \quad (12-8)$$

となる。

まずはブレイ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番目のブレイドを計測する時点での水素原子核の位置 (x'_0, y'_0) は、

$$\begin{cases} x'_0 = x_0 + v_x \cdot TR \\ y'_0 = y_0 + v_y \cdot TR \end{cases} \quad (12-9)$$

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

$$\begin{cases} x'_{n0} = x_0 + n v_x \cdot TR \\ y'_{n0} = y_0 + n v_y \cdot TR \end{cases} \quad (12-10)$$

となる。よって、動きが加わった n 番目のブレイドの計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x'_n t + G_p y'_n t_p)] \quad (12-11)$$

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

となる。ここで、

$$\begin{cases} x'_n = x'_{n0} \cos n\theta + y'_{n0} \sin n\theta \\ y'_n = -x'_{n0} \sin n\theta + y'_{n0} \cos n\theta \end{cases} \quad (12-13)$$

である。

次にブレイ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 で等速に動いたとすると、2番目のブレイドを計測する時点での水素原子核の位置 (x''_0, y''_0) は、

$$\begin{cases} x''_0 = x_0 \cos(v_\theta \cdot TR) + y_0 \sin(v_\theta \cdot TR) \\ y''_0 = -x_0 \sin(v_\theta \cdot TR) + y_0 \cos(v_\theta \cdot TR) \end{cases} \quad (12-14)$$

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

$$\begin{cases} x''_{n0} = x_0 \cos(nv_\theta \cdot TR) + y_0 \sin(nv_\theta \cdot TR) \\ y''_{n0} = -x_0 \sin(nv_\theta \cdot TR) + y_0 \cos(nv_\theta \cdot TR) \end{cases} \quad (12-15)$$

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，

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_r x''_n t + G_p y''_n t_p)] \quad (12-16)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_r x''_n t + G_p y''_n t_p)] \quad (12-17)$$

となる．ここで，

$$\begin{cases} x''_n = x''_{n0} \cos n\theta + y''_{n0} \sin n\theta \\ y''_n = -x''_{n0} \sin n\theta + y''_{n0} \cos n\theta \end{cases} \quad (12-18)$$

である．また，(12-15) 式より (12-18) 式は，

$$\begin{cases} x''_n = x_0 \cos[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] + y_0 \sin[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] \\ y''_n = -x_0 \sin[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] + y_0 \cos[n(\theta + v_\theta \cdot TR)] \end{cases} \quad (12-19)$$

となる．

〔第2節〕 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行う．磁気回転比は水素原子核の場合 42.58 MHz/T で，静磁場強度を 1T とし，読み出し方向の勾配磁場 G_r を 0.12 G/cm とする．水素原子の信号強度 S_0 は 1 とし， (x_0, y_0) を (2.0cm, 1.0cm) に設定する．FOV を 20cm の正方形と仮定し，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 12-4 のようになる．計測のサンプリングを 0.1ms ごとに行い，位相エンコード方向の勾配磁場を $t_p = 1$ ms で G_p を 0.012 G/cm ごとに变化させるものとする．また繰り返し時間 $TR = 1000$ ms 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，

$$\begin{aligned} & [\text{位相エンコードの数}] \times [\text{ブレイド数}] = \\ & [\text{読み出し方向のサンプリング数}] \times \quad / 2 \end{aligned} \quad (12-20)$$

の式より求めると，約 25 となる．

1 つ目のブレイドの計測は，

$$\begin{aligned} s_{re}(k, m) = & \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 2.0 \times k \times 10^{-4} \\ & + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 1 \times 10^{-3})] \end{aligned} \quad (12-21)$$

$$\begin{aligned} s_{im}(k, m) = & -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 2.0 \times k \times 10^{-4} \\ & + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 1 \times 10^{-3})] \end{aligned} \quad (12-22)$$

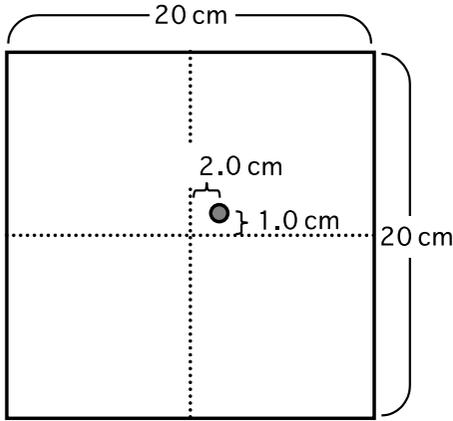


図12-4

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 正方で、水素原子は、(2.0cm, 1.0cm) の位置にある。

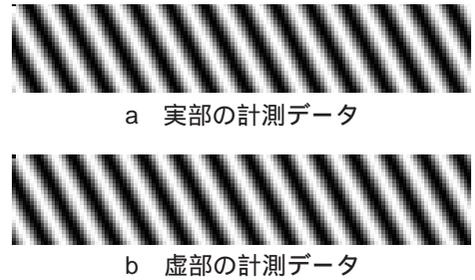


図12-5 1つ目のブレイドの計測データ

となる。ここで、 k はサンプリング点を表し、 -64 から 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

$$\begin{cases} x_n = 2.0 \cos(n\pi/8) + 1.0 \sin(n\pi/8) \\ y_n = -2.0 \sin(n\pi/8) + 1.0 \cos(n\pi/8) \end{cases} \quad (12-23)$$

として、(12-21)、(12-22) 式の2.0と1.0の部分それぞれ x_n と y_n の値に置き換えて求める。1つ目のブレイドの計測を図12-5に、8個のブレイドの計測を並べたものを図12-6に示す。8個のブレイドを k 空間に並べたものを図12-7に示す。それぞれaが実部で、bが虚部である。図12-7に示したデータから k 空間の格子点上に変換して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12-8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、(12-23) 式は、

$$\begin{cases} x_n = (2.0 + 0.2n) \cos(n\pi/8) + (1.0 + 0.3n) \sin(n\pi/8) \\ y_n = -(2.0 + 0.2n) \sin(n\pi/8) + (1.0 + 0.3n) \cos(n\pi/8) \end{cases} \quad (12-24)$$

となる。この場合、8個のブレイドの計測を順に並べたものを図12-9に示す。また、 k 空間に並べ替えて平均をとったものを図12-10に、そこから再構成したものを図12-11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、ブレイ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、 $v = 3.0\%$ の角速度で回転した場合を考える。すると、(12-23) 式は、

$$\begin{cases} x_n = 2.0 \cos(n\pi/8 + 3.0n\pi/180) + 1.0 \sin(n\pi/8 + 3.0n\pi/180) \\ y_n = -2.0 \sin(n\pi/8 + 3.0n\pi/180) + 1.0 \cos(n\pi/8 + 3.0n\pi/180) \end{cases} \quad (12-25)$$

となる。この場合、8個のブレイドの計測を順に並べたものを図12-12に示す。また、 k 空間に並べ替えて平均をとったものを図12-13に、そこから再構成したものを図12-14に示す。再構成画像には円弧状