



断層映像法の基礎 第35回 ヘリカルコーンビーム再構成

篠原 広行¹⁾、桑山 潤¹⁾、小川 亙¹⁾、軽部 修平¹⁾、藤堂 幸宏¹⁾、
橋本 雄幸²⁾

¹⁾ 首都大学東京人間健康科学研究科 放射線科学域

²⁾ 横浜創英短期大学 情報学科

はじめに

第34回では、2次元ファンビームを回転させながら被写体を体軸方向に移動して連続的に測定するスパイラルスキャンについて解説した。今回は、3次元コーンビームを回転させながら被写体をスライドさせて連続的に計測するヘリカルコーンビーム再構成について解説する。

1. 3次元コーンビームの計測と再構成
2. ヘリカルコーンビームの投影
3. ヘリカルコーンビームの再構成

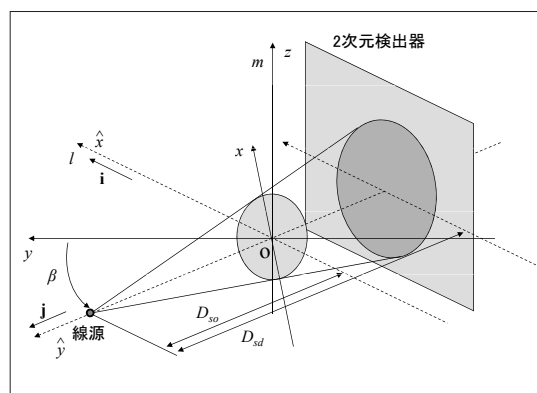


図1. 3次元コーンビーム投影の幾何学的配置

1. 3次元コーンビームの計測と再構成

3次元コーンビームについては第30回で解説しているが、ヘリカルコーンビーム再構成では3次元コーンビームを使用するので、その計測と再構成について簡単に触れる。

3次元コーンビームに対する投影は、図1に示すように線源から円錐状に放出されたX線を2次元の平面検出器で検出し、被写体の周りを1周し収集する。xy平面では、投影データはファンビームと等価になるので、解析的に完全な再構成が可能である。しかし、xy平面から離れると、z方向に角度がつくので完全な再構成が不可能となる。

3次元コーンビームの再構成は、検出器を原点にずらした仮想検出器を用いて考える。仮想検出器にずらす場合の標本間隔は、2次元検出器の横方向と

縦方向の標本間隔が等しいと仮定し、次のようになる。線源から原点を通る仮想検出器までの距離を D_{so} 、線源から実際の検出器までの距離を D_{sd} 、実際の検出器の標本間隔(検出器1つの幅、投影データの1画素の長さに相当)を Δd としたとき、仮想検出器での標本間隔 Δl は、

$$\Delta l = \frac{D_{so}}{D_{sd}} \Delta d \quad (1)$$

となる。

具体的な再構成法は、2次元ファンビームからの直接画像再構成法を利用して3次元コーンビームを近似的に再構成するFeldkampの方法が一般的で

ある。3次元コーンビームの場合、xy平面から離れるにしたがって2次元ファンビームを傾けて投影データを撮っているときみなして再構成を行う。

単位ベクトルや座標を図2の通り決定する。便宜上、第30回の図とは座標系の向きを変更している。具体的な再構成の手順は以下のようになる。

① コーンビームの投影データ $\hat{p}(l, m, \beta)$ に $D_{so}/\sqrt{D_{so}^2 + l^2 + m^2}$ を掛ける

$$\hat{p}'(l, m, \beta) = \hat{p}(l, m, \beta) \frac{D_{so}}{\sqrt{D_{so}^2 + l^2 + m^2}} \quad (2)$$

② 1次元のRamachandran-Lakshminarayananフィルタをそのまま投影データの l 方向に重量積分する (フィルタ補正にあたる)。

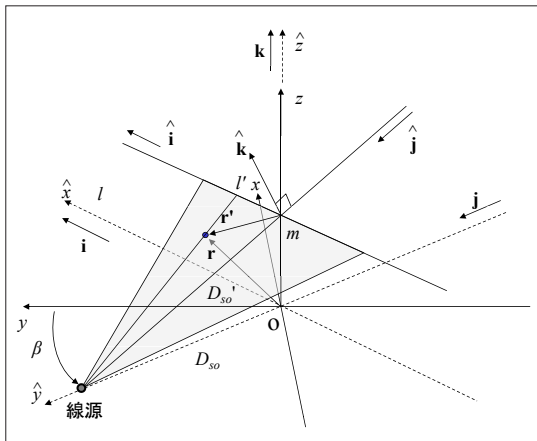


図2. コーンビームの投影データから Feldkamp の画像再構成を行う場合の座標系

$$q(l', m, \beta) = \int_{-l_{max}}^{l_{max}} \hat{p}'(l, m, \beta) h(l' - l) dl \quad (3)$$

$$h(l_i) = \begin{cases} \frac{1}{4(\Delta l)^2} & i=0 \\ 0 & i:\text{even} \\ -\frac{1}{\pi^2(l_i)^2} & i:\text{odd} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 Δl は l の標本間隔である。

③ フィルタ補正した投影データを以下の式で重み付けして逆投影する

$$f(r) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \frac{D_{so}^2}{(D_{so} + r \cdot j)^2} q(l', m, \beta) d\beta \quad (5)$$

$$l' = \frac{D_{so} r \cdot i}{D_{so} + r \cdot j} \quad (6)$$

$$m = \frac{D_{so} r \cdot k}{D_{so} + r \cdot j} \quad (7)$$

ここで、ベクトルの内積はそれぞれ

$$\begin{cases} r \cdot i = x \cos \beta + y \sin \beta \\ r \cdot j = -x \sin \beta + y \cos \beta \\ r \cdot k = z \end{cases} \quad (8)$$

となる。

3次元数値ファントムを図3に示す。3次元数値ファントムは楕円体を組み合わせて作成したもので、座標 (64, 64, 80) を通る xy 断面 (横断面)、yz 断面 (矢状面)、xz 断面 (冠状面)

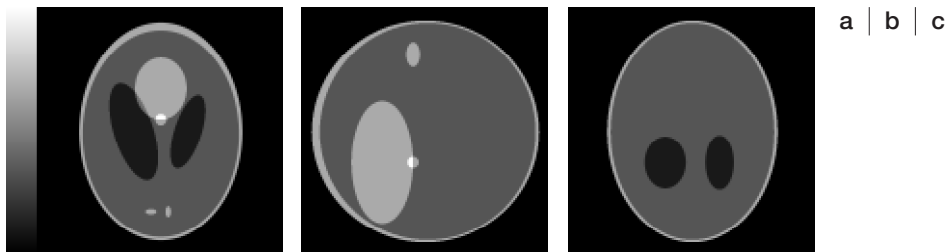


図3. 3次元数値ファントム

楕円体を組み合わせて作成したものである。

- (a) 座標 (64, 64, 80) を通る xy 断面 (横断面)
- (b) 座標 (64, 64, 80) を通る yz 断面 (矢状面)
- (c) 座標 (64, 64, 80) を通る xz 断面 (冠状面)

状面)、xz 断面(冠状面)をそれぞれ図 3(a),(b),(c)に示している。回転軸である z 方向の位置を変化させた xy 平面に平行な断層画像を図 4 に示す。図 4 (a) ~ (c) はそれぞれ $z = 100, 110, 120$ の場合の断層画像である。原画像は $128 \times 128 \times 128$ ボクセルで作成した。

その 3 次元数値ファントムから作成した 3 次元コーンビーム投影データを図 5 に示す。図 5 (a) はある角度の 2 次元検出器の 128×128 画素のデータである。そのデータが 360 度で 128 投影ある。図 5

(b) は 2 次元投影を重ねて回転軸に沿って切った断面である。また、図 5 (c) は中心のスライスに沿って切った断面である。この場合、中心のスライスにおける 2 次元ファンビームのサイングラムに相当する。

この投影データから Feldkamp の方法で再構成した画像を図 6 に示す。座標 (64, 64, 80) を通る xy 断面、 yz 断面、 xz 断面をそれぞれ図 6 (a), (b), (c) に示している。中心から上下にずれるにしたがって誤差が大きくなるので、被写体の上と下の部分にアーチファクト(偽像)が見られる。回転軸である z 方向の

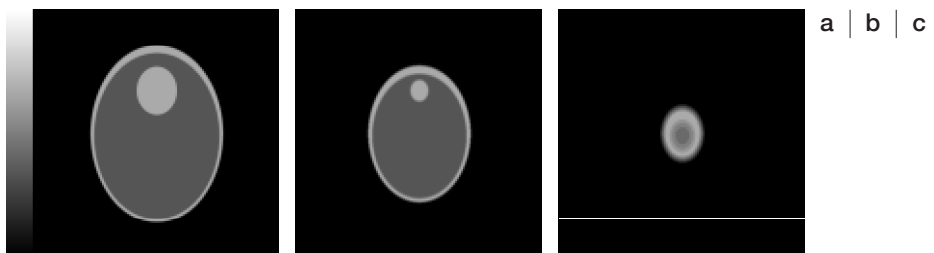


図 4. 回転軸である z 軸の値を変化させた場合の xy 平面に平行な断層画像
(a) $z = 100$ (b) $z = 110$ (c) $z = 120$

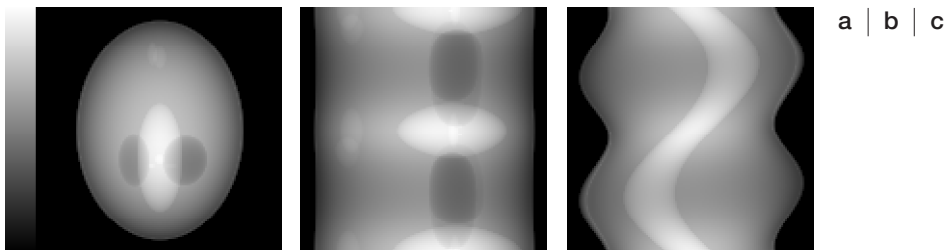


図 5. 3 次元コーンビームの投影データ ($128 \times 128 \times 128$ データ)
(a) xz 面 (2 次元検出器のある角度のデータ)
(b) yz 面 (回転軸に沿って切った断面)
(c) xy 面 (中心のスライスのサイングラムになっている)

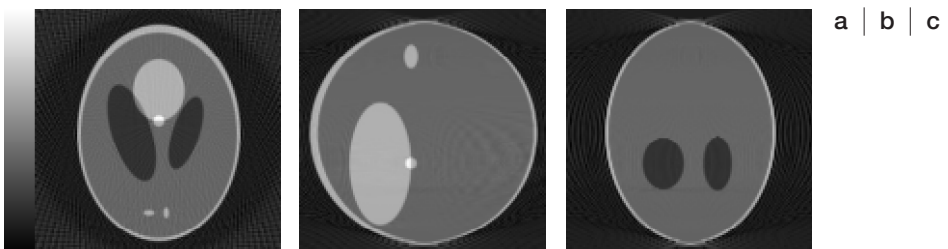


図 6. Feldkamp の方法で再構成した再構成画像
(a) 座標 (64, 64, 80) を通る xy 断面
(b) 座標 (64, 64, 80) を通る yz 断面
(c) 座標 (64, 64, 80) を通る xz 断面

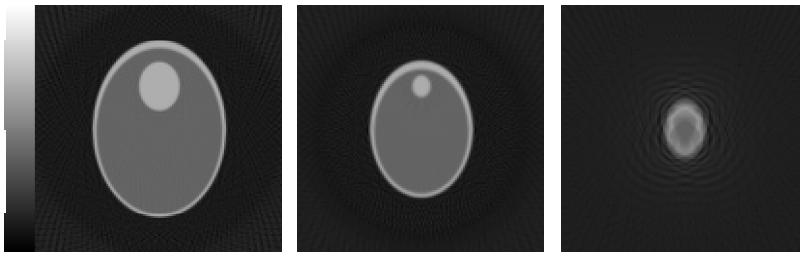


図7. 回転軸である z 軸の値を変化させた場合の xy 平面に平行な断層画像
(a) $z = 100$ (b) $z = 110$ (c) $z = 120$

位置を変化させた xy 平面に平行な断層画像を図7に示す。図7(a)～(c)はそれぞれ $z=100, 110, 120$ の場合の断層画像である。 z の値が大きくなるにつれて中央から離れていくので、誤差が大きくなる。Feldkamp の方法は近似の再構成法であるため、 xy 平面から離れてコーン角が大きくなると誤差が大きくなり、アーチファクトが目立つようになる。

2. ヘリカルコーンビームの投影

ヘリカルコーンビームの場合、図8に示すように3次元被写体に対して線源と2次元検出器を回転させて計測する。3次元被写体は計測している間 z 軸方向に連続的に移動する。3次元被写体に対する線源の位置は、相対的に見ると図9に示すようにスパイラル状に変化していく。これはスパイラルスキャンにおける線源の位置と同様である。

ヘリカルコーンビームの線源の位置 $S(\theta)$ は、

$$S(\theta) = (-D_{so} \sin \theta, D_{so} \cos \theta, \frac{d}{2\pi} \theta + z_0) \quad (9)$$

となる。ここで、 D_{so} は線源から回転中心までの距離、 d は線源の軌跡における回転周期の距離、 z_0 は z 方向の初期座標である。回転周期の距離 d と仮想検出器の z 軸方向の幅 V_z との間には以下の3つの関係が考えられる。

$$\begin{cases} d > 2V_z & \text{①} \\ d = 2V_z & \text{②} \\ d < 2V_z & \text{③} \end{cases} \quad (10)$$

それぞれの場合の模式図を図10(a)～(c)に示す。①の場合は、 z 軸方向に隙間が生じてしまうので、2次元ファンビームのスパイラルスキャンの時のように補間などの処理が必要となる。ヘリカルコーンビームでは①のように隙間が生じるようなスキャンは通常

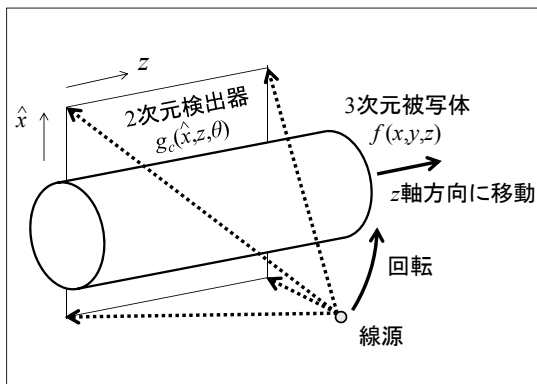


図8. ヘリカルコーンビームによる計測
コーンビームで計測しながら被写体が x 軸方向に連続的に移動する。

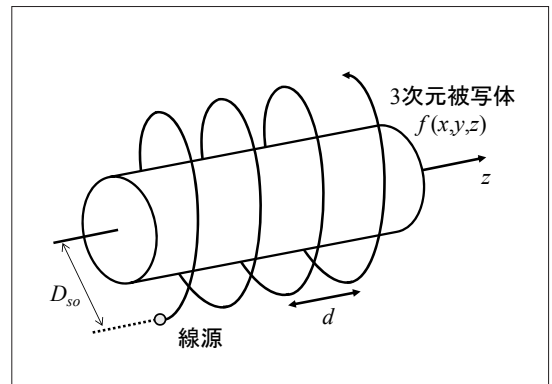


図9. ヘリカルコーンビームでの被写体に対する相対的な線源の位置
線源と検出器が回転しながら対軸方向に連続的に移動する。

行わない。②の場合は、ちょうど隙間なくスキャンすることができる。この場合の再構成は3次元コーンビームの再構成と同じような条件になる。ただし、単純な3次元コーンビームの場合とは被写体の1点を通るビームの軌跡が異なるので、再構成画像は異なった性質のものとなる。③の場合は、重なりが生じる。重なりを生じさせることによって、近似ではない解法が可能となる。次節では②の場合に注目し、Feldkampの方法を応用した近似的な解法について解説する。

3. ヘリカルコーンビームの再構成

この節では、線源の回転の周期 d と検出器の幅 V_z との関係が $d=2V_z$ となる場合について考える。再構成には、3次元コーンビームの再構成で用いた Feldkamp の方法を利用する。Feldkamp の方法は近似解なので、今回のヘリカルコーンビーム再構成も近似解となる。3次元コーンビーム投影での被写体の1点を通るビームの軌跡は図11のようになる。また、ヘリカルコーンビーム投影での被写体の1点を通るビームの軌跡は図12のようになる。両者を比べるとビームの軌跡は異なる方向を向いているのが分かる。

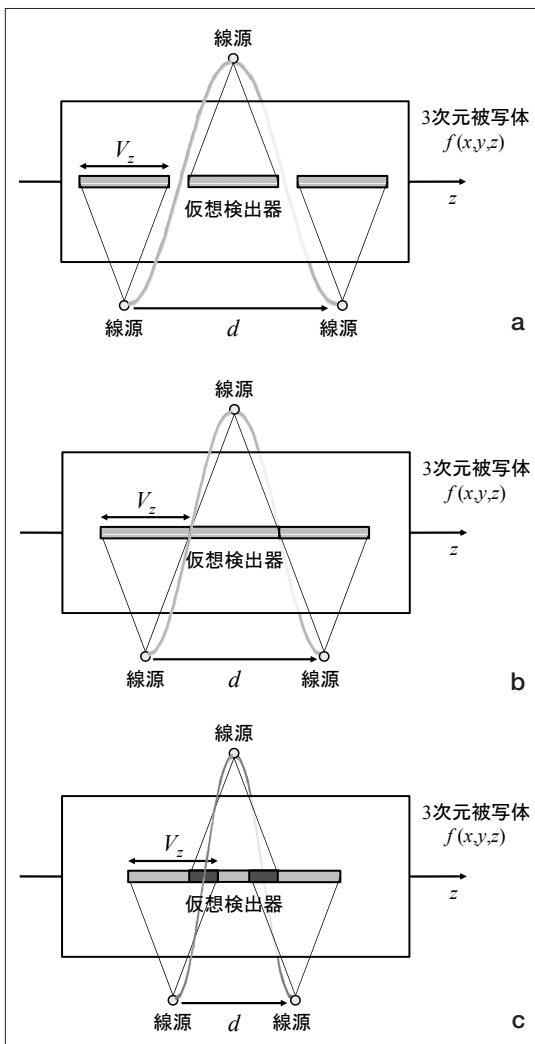


図 10. ヘリカルコーンビームの回転周期の距離 d と仮想検出器の幅 V_z との関係 (横から見た図)

(a) $d > 2V_z$ の場合 (b) $d = 2V_z$ の場合 (c) $d < 2V_z$ の場合

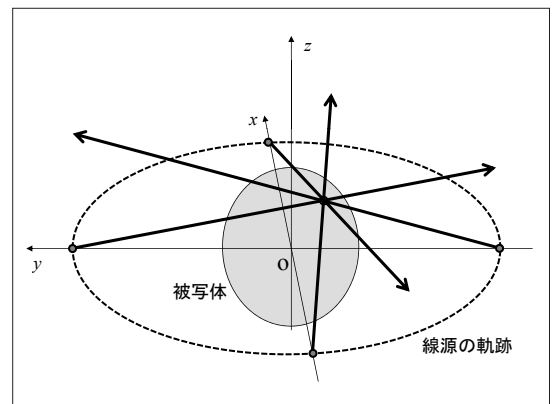


図 11. 3次元コーンビーム投影での被写体の1点を通るビームの軌跡

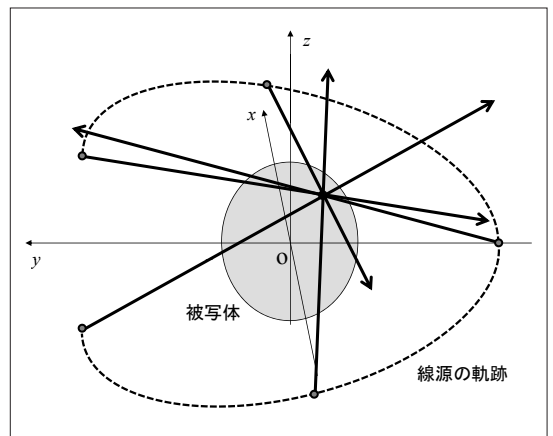


図 12. ヘリカルコーンビーム投影での被写体の1点を通るビームの軌跡

この軌跡を検出器上に表すと 図 13 のようになる。
 図 13 (a) は 3 次元コーンビーム投影である 1 点の投影の軌跡であり、図 13 (b) はヘリカルコーンビーム投影での同じ点の投影の軌跡である。両者を比較して分かるように、3 次元コーンビームでは線源が 1 周すると同じ位置に戻ってくるのに対し、ヘリカルコーンビームでは線源が 1 周すると検出器の上から下にカーブ描いて移動し、元の位置に戻ることはない。両者の逆投影では異なるデータを加えることになるので、再構成された画像は性質が異なってくる。ヘリカルコーンビームの Feldkamp の方法を利用した再構成の手順は以下のようになる。

① ヘリカルコーンビームの投影データ $\hat{p}(l, m, \theta)$ に $D_{so}/\sqrt{D_{so}^2 + l^2 + m^2}$ を掛ける

$$\hat{p}'(l, m, \theta) = \hat{p}(l, m, \theta) \frac{D_{so}}{\sqrt{D_{so}^2 + l^2 + m^2}} \quad (11)$$

② 1 次元の Ramachandran-Lakshminarayanan フィルタをそのまま投影データの l 方向に重畳積分する (フィルタ補正にあたる)。

$$q(l', m, \theta) = \int_{-l_{max}}^{l_{max}} \hat{p}'(l, m, \theta) h(l' - l) dl \quad (12)$$

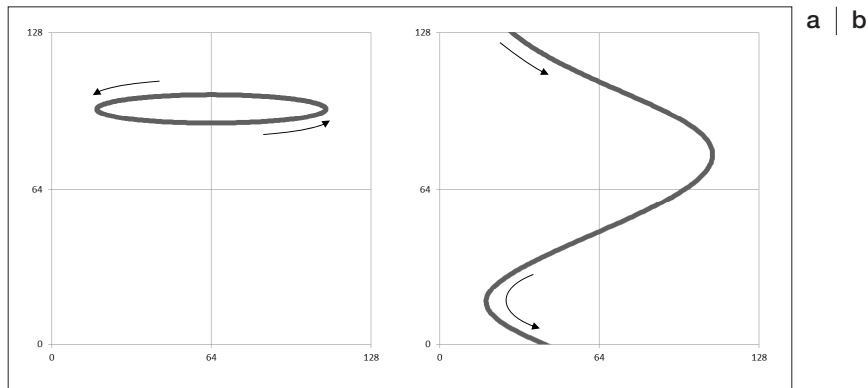


図 13. 被写体のある 1 点を検出器上に描く軌跡
 (a) 3 次元コーンビーム投影の場合 (b) ヘリカルコーンビーム投影の場合

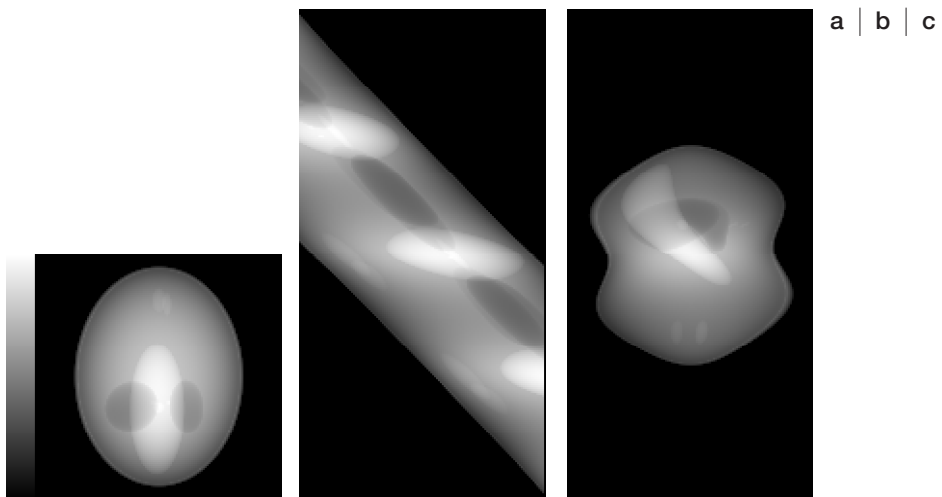


図 14. ヘリカルコーンビームの投影データ (128 × 128 × 256 データ)
 (a) xz 面 (2 次元検出器のある角度のデータ)
 (b) yz 面 (回転軸に沿って切った断面)
 (c) xy 面 (検出器の中心スライスの変化)

③ フィルタ補正した投影データを以下の式で重み付けして逆投影する

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \int_0^{\theta_{\max}} \frac{D_{s0}^2}{(D_{s0} + \mathbf{r} \cdot \mathbf{j})^2} q(l', m, \theta) d\theta \quad (13)$$

$$l' = \frac{D_{s0} \mathbf{r} \cdot \mathbf{i}}{D_{s0} + \mathbf{r} \cdot \mathbf{j}} \quad (14)$$

$$m = \frac{D_{s0} \left\{ \mathbf{r} \cdot \mathbf{k} - \left[\frac{d}{2\pi} \theta + z_0 \right] \right\}}{D_{s0} + \mathbf{r} \cdot \mathbf{j}} \quad (15)$$

ここで、ベクトルの内積はそれぞれ

$$\begin{cases} \mathbf{r} \cdot \mathbf{i} = x \cos \theta + y \sin \theta \\ \mathbf{r} \cdot \mathbf{j} = -x \sin \theta + y \cos \theta \\ \mathbf{r} \cdot \mathbf{k} = z \end{cases} \quad (16)$$

となる。

3次元コーンビーム再構成に対してヘリカルコーンビーム再構成は線源と検出器がz方向に変化しているので、mを求める(7)式と(15)式が大きく異なる。それ以外は同じ手順で再構成を進めることができる。

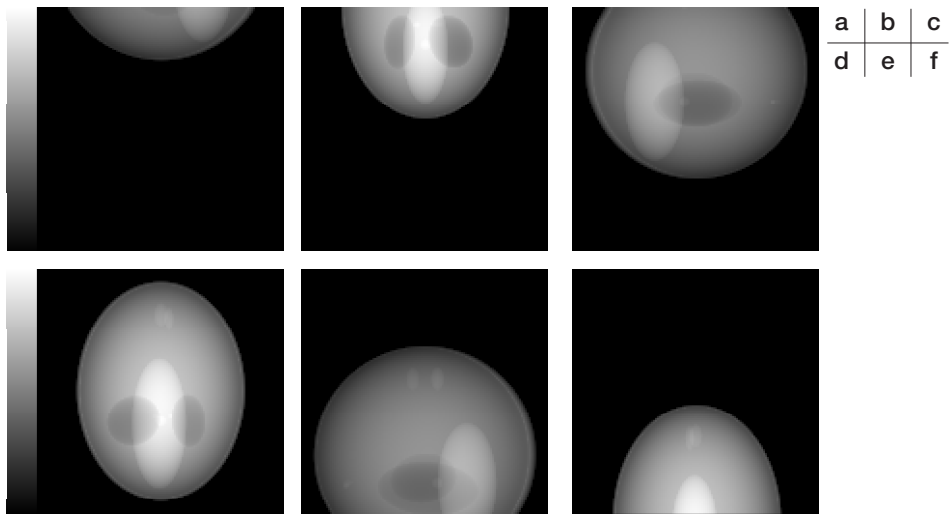


図 15. ヘリカルコーンビームの投影データの角度変化に対するxz面(2次元検出器)のデータ

(a) 90度 (b) 180度 (c) 270度
(d) 360度 (e) 450度 (f) 540度

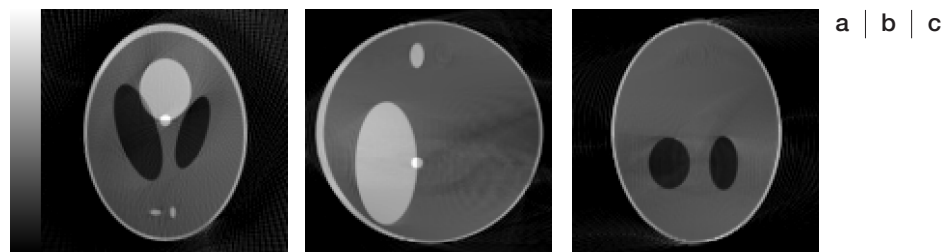


図 16. Feldkamp の方法を利用したヘリカルコーンビームの再構成画像

(a) 座標 (64, 64, 80) を通る xy 断面
(b) 座標 (64, 64, 80) を通る yz 断面
(c) 座標 (64, 64, 80) を通る xz 断面

図3に示す3次元数値ファントムから作成したヘリカルコーンビームの投影データを図14に示す。図14(a)は、ある角度の2次元検出器の 128×128 画素のデータである。今回のヘリカルコーンビームでは2回転して720度で256投影ある。図14(b)は2次元投影を2回転分重ねて回転軸に沿って切った断面である。また、図14(c)は検出器の中心のスライスに沿って切った断面である。また、投影データの角度変化に対するxz面(2次元検出器)のデータを図15に示す。図15(a)～(f)は、90度ごとに2次元検出器で検出されたデータを示している。

この投影データからここで解説した方法で再構成した画像を図16に示す。座標(64, 64, 80)を通るxy断面、yz断面、xz断面をそれぞれ図16(a), (b), (c)に示している。誤差はz方向にかかわらず同じになるので、アーチファクト(偽像)は上下に偏らず

全体的に見られる。回転軸であるz方向の位置を変化させたxy平面に平行な断層画像を図17に示す。図17(a)～(c)はそれぞれ $z = 100, 110, 120$ の場合の断層画像である。zの値に関わらず同じようにアーチファクトが生じている。1回転して元の位置に戻るわけではないので、楕円の周りなどには角度依存性のあるアーチファクトが見られる。

ヘリカルコーンビーム再構成では、Feldkampの方法を利用した近似解ではアーチファクトが目立ってしまうので、実際には(10)式の③の条件を利用したより厳密な方法や繰り返しの方法が使われる。

謝辞: 本研究で使用したプログラムの開発は平成17年度～平成22年度首都大学東京共同研究費(富士フィルムRIファーマ株式会社)によるものである。

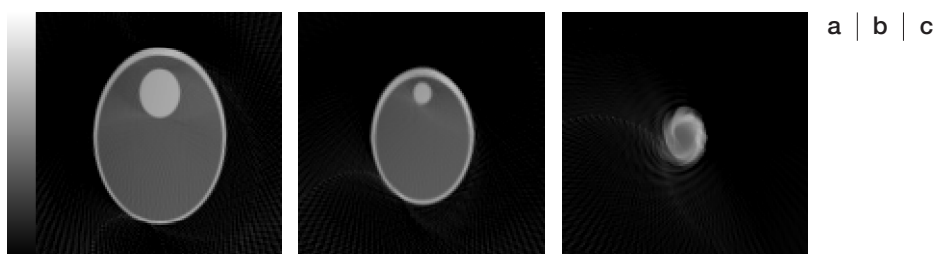


図17. 回転軸であるz軸の値を変化させた場合のxy平面に平行な断層画像

(a) $z = 100$ (b) $z = 110$ (c) $z = 120$