



断層映像法の基礎 第34回 スパイラルスキャン CT

篠原 広行¹⁾、桑山 潤¹⁾、小川 互¹⁾、軽部 修平¹⁾、小島 慎也¹⁾、藤堂 幸宏¹⁾、
中世古 和真²⁾、橋本 雄幸³⁾

¹⁾ 首都大学東京人間健康科学研究科 放射線科学域

²⁾ 東邦大学医療センター大橋病院

³⁾ 横浜創英短期大学 情報学科

はじめに

第33回では検出確率 C_{ij} の関係を行列とベクトルの計算式に置き換えて解を求める最小二乗法を利用した方法について解説した。今回は、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する。また、その方法を利用した再構成方法についても紹介する。

1. 3次元被写体の計測
2. スパイラルスキャンの投影
3. スパイラルスキャンの再構成

1. 3次元被写体の計測

X線CTの計測の基本は、体軸に垂直な1つの断層面を2次元の被写体として、全方向においてスキャンを行うことである。図1に示すように、ある一方向で線源と検出器を平行に動かし被写体をスキャンする。線源と検出器を回転させ、その方向を変えて同様なスキャンを繰り返す。全方向において一様にスキャンしたら計測を終了する。この計測で得られる投影は

$$g(X, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \quad (1)$$

となる。この関係式はラドン変換と呼ばれる。 $f(x, y)$

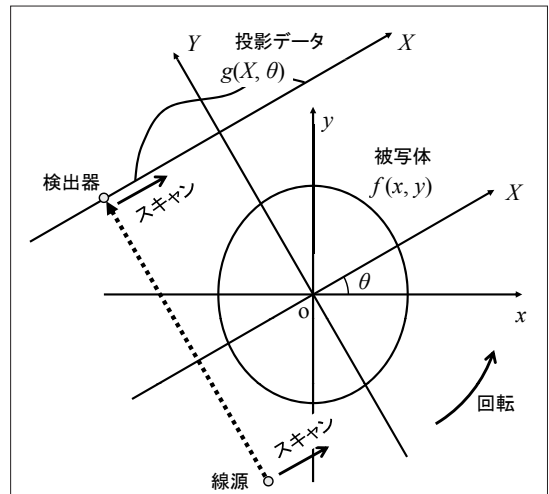


図1. 第1世代X線CTの計測

線源と検出器が平行に動きスキャンをする。1回のスキャンが終わったら全体を回転させ次のスキャンをする。

が2次元の被写体で、Y方向への積分は線源から検出器までの直線状に沿った線積分となる。角度 θ 回転したときにX方向にスキャンして得られるデータが $g(X, \theta)$ である。この方法を第1世代のX線CTと呼んでいる。第1世代では、スキャンしてから回転するという2つのステップを繰り返すことになるので、計測効率が悪くなる。

計測効率をよくするために考えられたのがファンビームによる計測である。図2に示すように線源から

放射状に X 線を照射し、対面に検出器の列を置いておき、一度に1つの角度データを取得する。後は全体を1回転しながら次々と角度データを取得することで計測を終了する。この計測で得られる投影は

$$g_f(X, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dl \quad (2)$$

となる。ここで l はファンビームのファンに沿った直線である。このファンビームの投影データは、

$$g_f(X, \theta) = g\left(\frac{L_0 X}{\sqrt{X^2 + L_d^2}}, \theta + \tan^{-1} \frac{X}{L_d}\right) \quad (3)$$

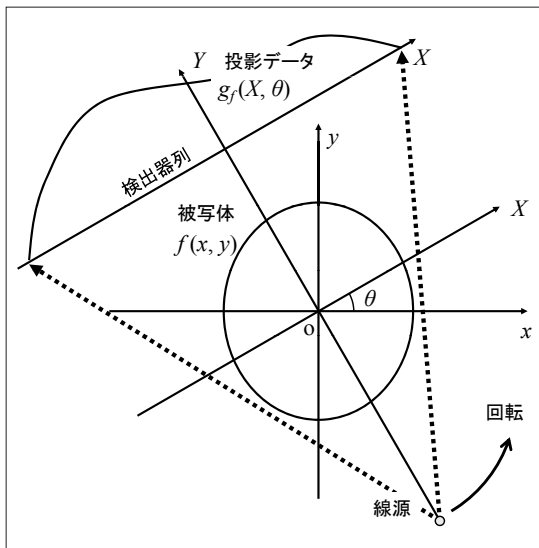


図2. 第3世代 X 線 CT の計測
ファンビームで1つの角度データを1度に取得する。全体を回転させ次々とデータを取得する。

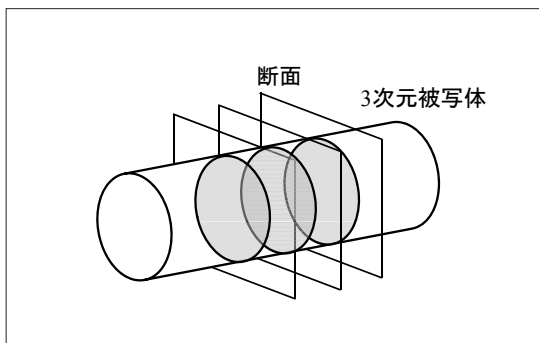


図3. 3次元被写体の断面の積み重ね
第1世代や第3世代など2次元画像の再構成をする計測では、断面を積み重ねることで3次元被写体を計測し、再構成する。

の関係式で第1世代であるパラレルビームの投影に換算できる。ここで L_0 は線源から回転中心までの距離で、 L_d は線源から検出器までの距離である。この方法を第3世代の X 線 CT と呼んでいる。1断面だけを計測し、再構成する X 線 CT の装置は、ほとんどがこの第3世代である。

これらの方法は3次元被写体の1つの断面を決定し、2次元の画像を再構成する。図3に示すように、これらの方法ではその断面を積み重ねることで3次元データを構築できる。これに対し、3次元データを直接的に計測する方法がある。1番目は第30回で解説した3次元コーンビームの計測方法である。2番目は今回の題名にもなっているスパイラルスキャンと呼ばれる計測方法で、ファンビームの計測に被写体を体軸方向に連続的に移動させるという方法を組み合わせている。3番目はコーンビームとスパイラルスキャンを組み合わせたヘリカルスキャンと呼ばれる方法である。

コーンビームによる計測は、図4に示すように線源から円錐状に X 線を照射し、2次元検出器を用いて計測する。それを1回転するだけで3次元投影データを得ることができる。この計測で得られる投影は

$$g_c(X, Z, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) dl \quad (4)$$

となる。ここで l はコーンビームのコーンに沿った直線である。第30回でも解説したが、コーンビームの計測ではコーン角が大きくなるほど正確な再構成ができなくなり、再構成画像にアーチファクトが生じる。

スパイラルスキャンによる計測は、図2に示し

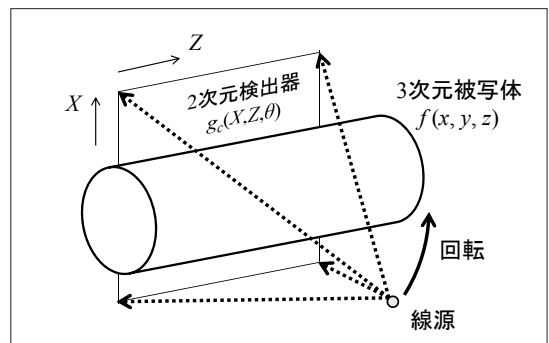


図4. コーンビームによる計測

たファンビームの計測がもとになっている。2次元のファンビームの計測は、体軸方向の場所を変えずに1回転して計測する。スパイラルスキャンの場合は、回転しながら体軸方向の場所を連続的に変えていく。実際には被写体を体軸方向に移動させながら計測するが、被写体を固定して考えると図5に示すように、線源と検出器のペアが被写体を回転しながら体軸方向に移動するような軌跡を描く。スパイラルスキャンの場合は1回転ではなく、被写体をすべてスキャンするまで回転し続ける。この計測で得られる投影は

$$g_r(X, Z, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) dl \quad (5)$$

となる。ここで l は体軸方向に垂直なファンビームのファンに沿った直線である。ただし、

$$Z = k\theta \quad (6)$$

となり、角度 θ の値によって図5の体軸方向の座標 Z が比例的に変化する。 θ の値は360度を超えて変化する。角度によって異なる面をスキャンすることになるので、正確な再構成は望めない。近似的な再構成にはなるが、体軸方向に滑らかな画像が得られる。

ヘリカルスキャンは、コーンビームの計測がもとになり、回転しながら体軸方向の場所を連続的に変えていく。スパイラルスキャンの考え方と同様なので、

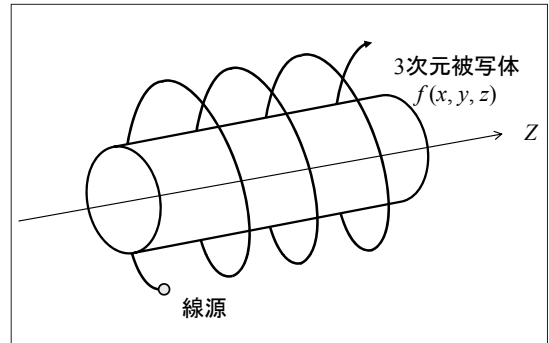


図5. スパイラルスキャン
線源と検出器が回転しながら対軸方向に連続的に移動する。

投影データの一般式を考えた場合は、(4)式と(6)式の組み合わせとなる。1つの角度データが2次元で取得されるので、スパイラルスキャンに比べて高速なデータ取得が可能である。

2. スパイラルスキャンの投影

3次元数値ファントムを図6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(トランスバース)、 yz 断面(サジタル)、 xz 断面(コロナル)をそれぞれ図6(a), (b), (c)に示している。原画像は 128×128 ボクセルで作成した。

この3次元数値ファントムをもとにして $z = 80$ のスライスで作成した2次元のファンビームの投影を図7



図6. 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。
(a) 座標(64, 64, 80)を通る xy 断面(トランスバース)
(b) 座標(64, 64, 80)を通る yz 断面(サジタル)
(c) 座標(64, 64, 80)を通る xz 断面(コロナル)

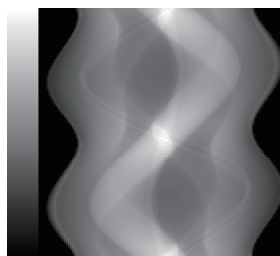


図7. 3次元数値ファントムをもとに $z = 80$ のスライスで作成したファンビームの投影

に示す。投影は検出器数 128、360 度で 128 投影である。体軸の z 方向には移動していないので、360 度の投影においては最初 (投影画像の上側) と最後 (投影画像の下側) は連続してつながる。

スパイラルスキャンの線源の軌跡を横から見ると図 8 に示すように正弦曲線を描く。1つの周期の距離を d とすると (6) 式の比例定数 k は、

$$k = \frac{d}{2\pi} \quad (7)$$

となる。 $d = 1$ 画素長、4 画素長、16 画素長のときのスパイラルスキャンの 1 回転分の投影をそれぞれ図 9 (a), (b), (c) に示す。 $d=4$ 画素長では視覚的に違いは分らないが、 $d=16$ 画素長になると投影画像

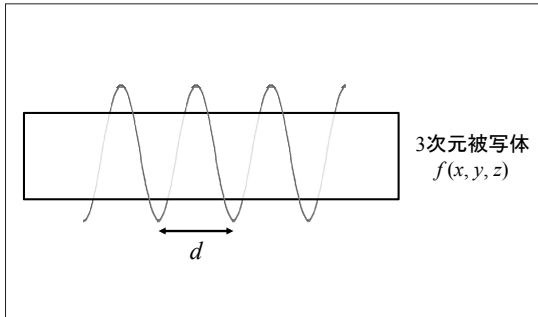


図 8. スパイラルスキャンの線源の軌跡を横から見た図

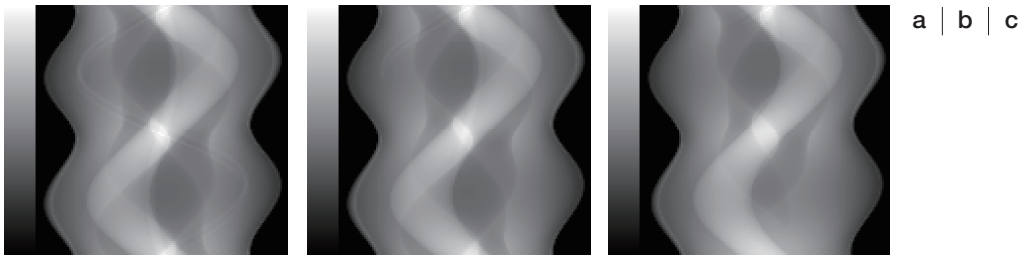


図 9. スパイラルスキャンの 360 度分の投影データ
(a) 周期 $d=1$ 画素長 (b) 周期 $d=4$ 画素長 (c) 周期 $d=16$ 画素長

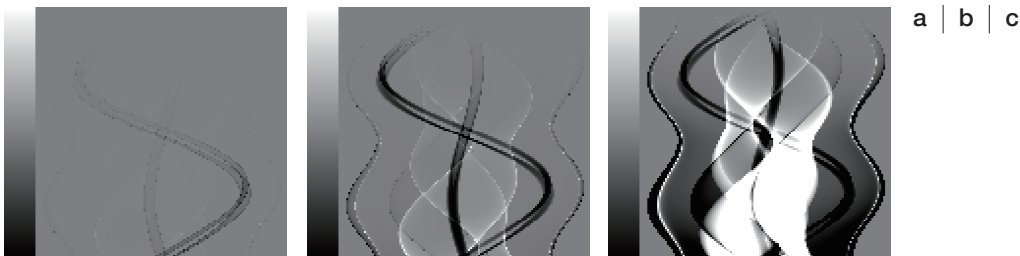


図 10. スパイラルスキャンとファンビームの投影の差分画像
(a) 周期 $d=1$ 画素長 (b) 周期 $d=4$ 画素長 (c) 周期 $d=16$ 画素長

の上側と下側ではっきりとした違いが出てくる。ファンビーム投影との差分画像を図 10 に示す。楕円体の場合、投影が下に行くにつれ境界部分がはっきり浮かび上がる。これは、回転に伴って z 軸が変化するとともに楕円体を切ったときの径が変わってくるので、境界部分で大きな差となって現れるためである。

3. スパイラルスキャンの再構成

スパイラルスキャンでは、回転とともに体軸 (z 軸) に沿ってずれた異なる面のデータが取られるので正確な再構成はできない。そこで図 11 に示すように、再構成をする面に対して同じ角度になるスパイラルの前後のデータから線形補間でデータを作成する。その補間をしたデータをもとにファンビームの再構成を行う。

再構成する面を Z_0 、そのときの角度を θ_0 とすると、(6) 式と (7) 式より、

$$Z = \frac{d}{2\pi} (\theta - \theta_0) + Z_0 \quad (8)$$

となる。(8) 式の θ を θ_1 と置き $\theta_0 < \theta_1 < \theta_0 + 2\pi$ と

すると、 θ_0 を挟んで θ_1 と反対側にある θ_{-1} は

$$\theta_{-1} = \theta_1 - 2\pi \quad (9)$$

となる。よって θ_1 と θ_{-1} に対応し線形補間に利用する Z_1 と Z_{-1} は

$$Z_1 = \frac{d}{2\pi}(\theta_1 - \theta_0) + Z_0 \quad (10)$$

$$Z_{-1} = \frac{d}{2\pi}(\theta_1 - \theta_0 - 2\pi) + Z_0 \quad (11)$$

となる。したがって線形補間の式は

$$g_f'(X, Z_0, \theta_0) = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 - Z_{-1}} g_f(X, Z_{-1}, \theta_{-1}) + \frac{Z_0 - Z_{-1}}{Z_1 - Z_{-1}} g_f(X, Z_1, \theta_1) \quad (12)$$

となり、この式に (10) 式と (11) 式を代入すると

$$g_f'(X, Z_0, \theta_0) = \frac{\theta_1 - \theta_0}{2\pi} g_f(X, Z_{-1}, \theta_{-1}) + \frac{2\pi - (\theta_1 - \theta_0)}{2\pi} g_f(X, Z_1, \theta_1) \quad (13)$$

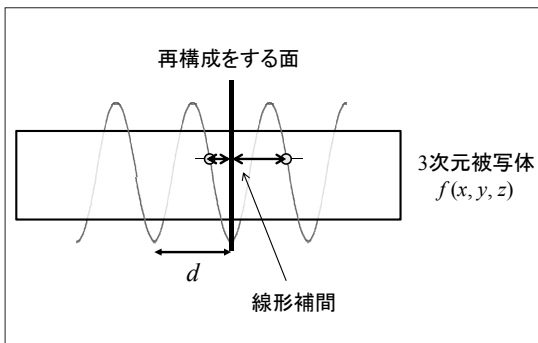


図 11. スパイラルスキャンでスライス面のデータを作成する線形補間

となる。ここで

$$k = \frac{\theta_1 - \theta_0}{2\pi} \quad (14)$$

と置けば、

$$g_f'(X, Z_0, \theta_0) = k g_f(X, Z_{-1}, \theta_{-1}) + (1-k) g_f(X, Z_1, \theta_1) \quad (15)$$

と表すことができる。

図 7 に示したファンビームの投影からファンビームの再構成法で再構成した画像を図 12 に示す。360 度で 128 投影なので角度方向のサンプリングが足りなくて放射線状のアーチファクトが多少目立つが、全体的には良好に再構成されている。(15) 式の線形補間を用いて作成したファンビームの投影データを、 $d = 1$ 画素長、4 画素長、16 画素長のときについてそれぞれ図 13 (a), (b), (c) に示す。その投影データから再構成した画像を図 14 (a), (b), (c) に示す。スパイラルスキャンの周期 d の値が大きくなれば再構成画像の正確さが低下する。周期 d が 1 画素長のときは目立った歪みは見られないが、4 画素長になると画像下部の小さな楕円がぼけより薄くなっている。

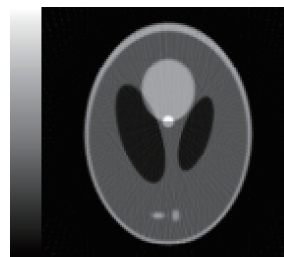


図 12. ファンビームの投影からの再構成画像 正確に再構成される。

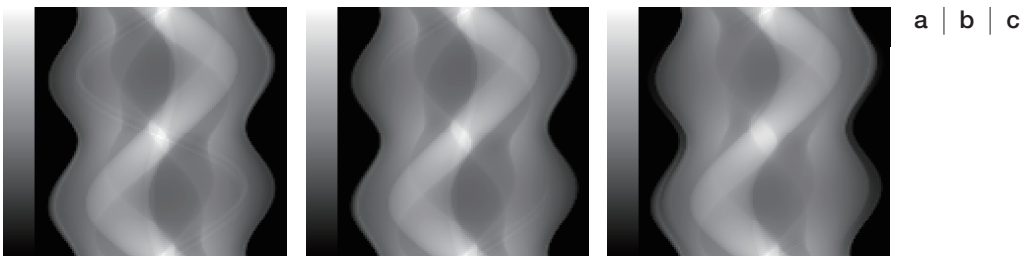


図 13. スパイラルスキャンのデータから線形補間で作成したファンビームの投影データ (a) 周期 $d = 1$ 画素長 (b) 周期 $d = 4$ 画素長 (c) 周期 $d = 16$ 画素長

16画素長では、スパイラルスキャンの再構成画像に特徴的な輪郭がぶれるアーチファクトが生じている。ファンビームの投影から再構成した図12の画像とそれぞれの再構成画像との差分画像を図15に示す。

スパイラルスキャンでは、周期 d の値が大きくなると再構成画像の正確さが低下するが、周期 d を大きくすることで3次元被写体の高速スキャンが可能となる。

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。

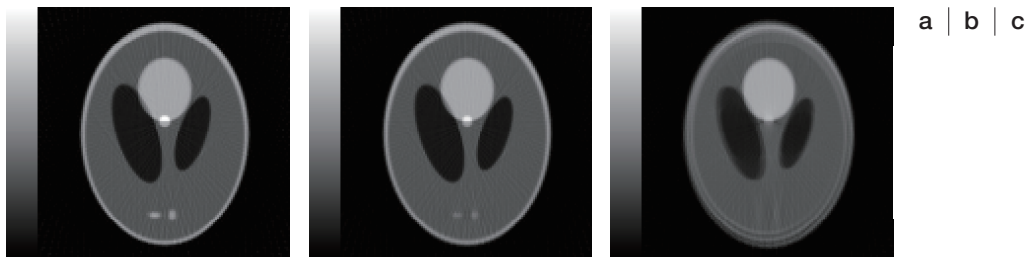


図14. スパイラルスキャンのデータから再構成した画像
(a) 周期 $d=1$ 画素長 (b) 周期 $d=4$ 画素長 (c) 周期 $d=16$ 画素長

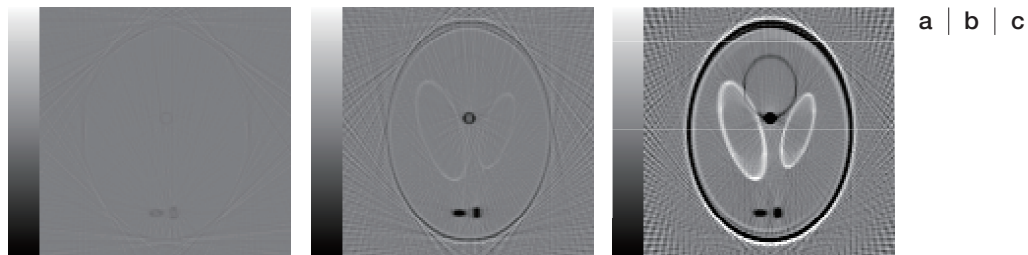


図15. スパイラルスキャンのデータから再構成した画像とファンビームの投影から再構成した画像の差分画像
(a) 周期 $d=1$ 画素長 (b) 周期 $d=4$ 画素長 (c) 周期 $d=16$ 画素長