

深さに依存する 検出器特性の補正

〔第1節〕 深さに依存する検出器特性

SPECTの放射線計測では、1回の放射過程において放出される1個の線を計測の単位とするため、放射線が飛んでくる方向を確定することができない。そこで一定の方向からの放射線のみをとらえるため、コリメータを検出器の前に置いている。理想的には図5-1aに示すようにコリメータから帯状に伸びた範囲から放出された放射線を検出器が検出できればいいのであるが、実際には1つのコリメータに幅があり、その長さも有限であるので図5-1bに示すようにコリメータから離れるにしたがって広がるような範囲から放射線が検出される。このように、検出器から離れるにしたがって検出の特性は異なってくる。

もともと検出器の特性は、その分解能を考慮してガウス関数で示されることが多い。分解能を標準偏差 σ で表したとき、ガウス関数は、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5-1)$$

と表される。ここで x_0 は注目する1つの検出器の中心位置である。通常、分解能は半値幅で表すが、半値幅を w_h とすると、

$$\exp\left[-\frac{(w_h/2)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{2} \quad (5-2)$$

となる。よって、

$$\begin{aligned} w_h &= 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \\ &\approx 2.35482\sigma \end{aligned} \quad (5-3)$$

となる。SPECTの場合、この半値幅が検出器からの距離 l の関数となる。通常は、検出器からの距離に対する1次関数とみなされるので、

$$w_h(l) = \alpha l \quad (5-4)$$

と表される。ここで α は比例定数で、コリメータの特性から決められる。よって、検出器の特性は、

$$f(x, l) = \frac{2\sqrt{2\ln 2}}{\sqrt{2\pi}\alpha l} \exp\left[-\frac{4\ln 2 \cdot (x-x_0)^2}{(\alpha l)^2}\right] \quad (5-5)$$

となる。

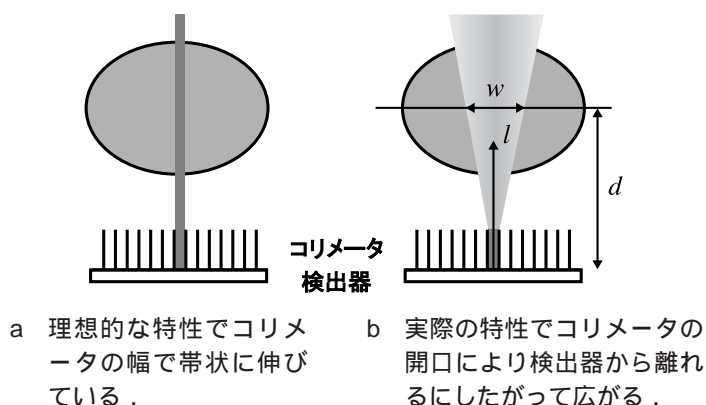


図5-1 検出器の特性

〔第2節〕 検出器特性を考慮した楕円の投影データ作成

検出器から被写体の回転中心までの距離を d とし、その距離での検出器特性の半値幅を w とすると、検出器の半値幅の特性は、

$$w_h(l) = \frac{w}{d} l \quad (5-6)$$

となる。楕円データから投影を作成するには、(3-9) 式を用いて投影データ $p(X, \theta)$ を求める。これに検出器の特性を加えるために、半値幅を n 個に分けて1つの検出器から放射状の直線を考え、それぞれの直線に沿った投影を積み付けして足し合わせる。 i 番目の積み付けの関数 h_i は $x - x_0 = -w/2 + wi/n$ と $l = w$ を (5-5) 式に代入し、それに1つの幅 w/n を掛け合わせて、

$$h_i = \frac{2\sqrt{2\ln 2}}{\sqrt{2\pi n}} \exp\left[-\ln 2 \cdot \left(\frac{2i}{n} - 1\right)^2\right] \quad (5-7)$$

となる。また、 i 番目での中心から動径方向と角度のずれは、

$$\begin{aligned} \Delta X_i &= d \sin \Delta \theta \\ \Delta \theta_i &= \tan^{-1}\left[\frac{w}{nd}\left(i - \frac{n}{2}\right)\right] \end{aligned} \quad (5-8)$$

となり、検出器特性を加えた投影データ $p_d(X, \theta)$ は、

$$p_d(X, \theta) = \sum_{i=1}^n h_i \cdot p\left(X + \Delta X_i, \theta + \Delta \theta_i\right) \quad (5-9)$$

となる。

SPECT の楕円の投影データを作成するプログラム 3-1 に (5-9) 式を加えたプログラムをプログラム 5-1 に示す。プログラム 5-1 を用いて投影データを実際に作成するプログラムをプログラム 5-2 に示す。深さに依存する検出器特性の様子がわかりやすいように、図 5-2 に示すようなファントムを用いる。このファントムの楕円データを表 5-1 に示す。プログラム 5-2 を用いて作成したこのファントムの投影デ

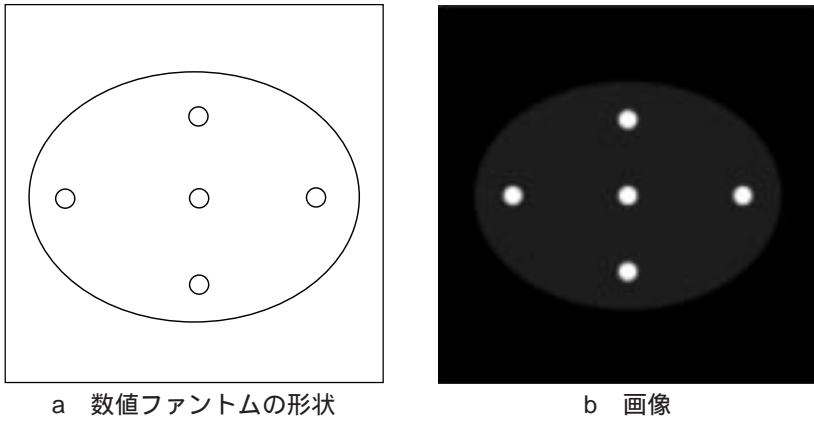
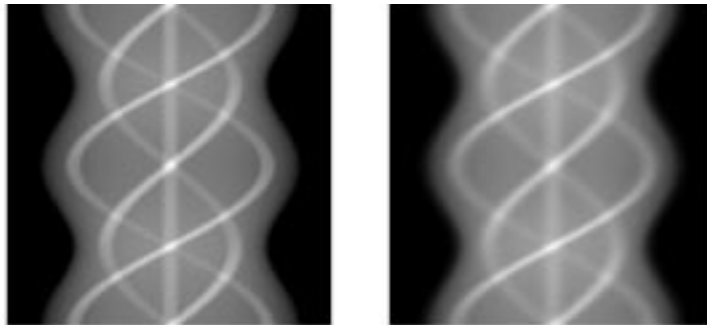


図5-2 深さに依存する検出器特性用の数値ファントム

表5-1 深さに依存する検出器特性用の数値ファントムの楕円データ

中心の座標	短軸の長さ	長軸の長さ	回転角度(°)	楕円の値	線減弱係数
(0.0, 0.0)	0.8	0.6	0.0	0.3	0.15
(0.0, 0.0)	0.05	0.05	0.0	1.0	0.15
(-0.6, 0.0)	0.05	0.05	0.0	1.0	0.15
(0.6, 0.0)	0.05	0.05	0.0	1.0	0.15
(0.0, -0.4)	0.05	0.05	0.0	1.0	0.15
(0.0, 0.4)	0.05	0.05	0.0	1.0	0.15



a 検出器特性を考慮しないで作成した投影データ
b 検出器特性を考慮して作成した投影データ

図5-3 表5-1の楕円データから作成した投影データ

ータを図5-3に示す。

この投影データからそのまま解析解で再構成した画像を図5-4に示す。まわりの小円に注目すると、楕円形に歪んでいるのが見られる。これは図5-5に示すように、端の方にある円形をした線源分布の計測は、検出器から離れるにしたがって広がった線源が検出される。再構成ではそのまま直線状に逆投影されるので、線源に近い強度の強い投影データの重みが大きくなり、楕円形に再構成される。

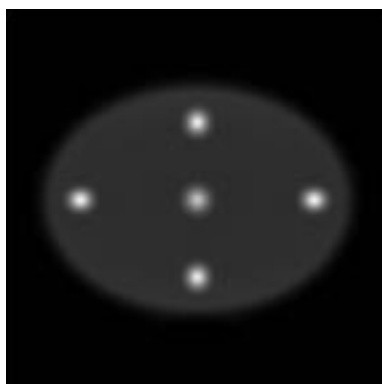


図5-4 図5-3bの投影データからそのまま解析解で再構成した画像

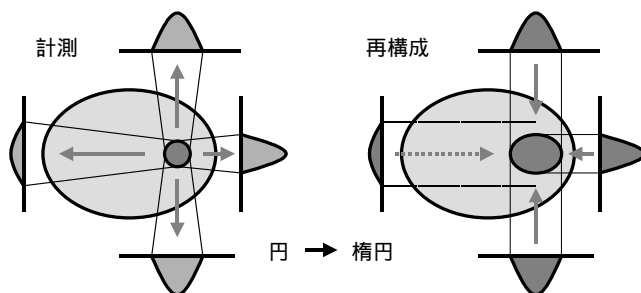


図5-5 深さに依存する検出器特性による再構成画像の歪み

検出器の前に置いてあるコリメータの特性によって、点線源のPSF (point spread function : 点広がり関数) が検出器から離れるにしたがって広がる。これをそのまま再構成すると被写体の端のほうで円形をしていた線源分布は楕円形に歪む。

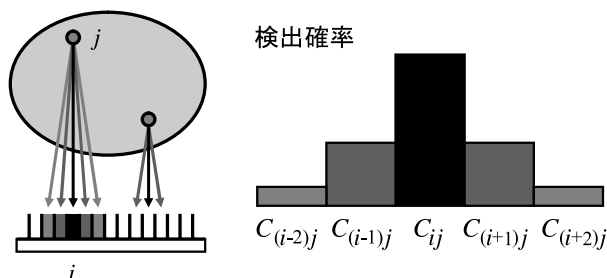


図5-6 検出器特性を考慮した検出確率

検出確率 C_{ij} に広がりを持たせて考えることで、画像から検出器特性を考慮した投影データを作成できる。

〔第3節〕 検出器特性を考慮した画像からの投影データ作成

第3章4節で解説した画像からSPECTの投影データを作成する手順に、図5-6に示すように画像位置 i から検出器位置 j までの距離を考慮して、検出確率をまわりの検出器に広げることによって、深さに依存する検出器特性を含めた投影データを作成することができる。画像の各画素から減弱を考慮して検出器にどの割合で投影されるかを計算するプログラム3-6に、深さに依存する検出器特性を含めたプログラムをプログラム5-3に示す。そのプログラムを用いて、画像から投影を作成するプログラムをプログラム5-4に示す。プログラム5-4を実行して、図5-2に示す楕円ファントムの画像と図5-7に示す線減弱係数分布の画像から作成した投影データのサイノグラムを図5-8に示す。図5-3bとほぼ等しい投影データが作成されている。

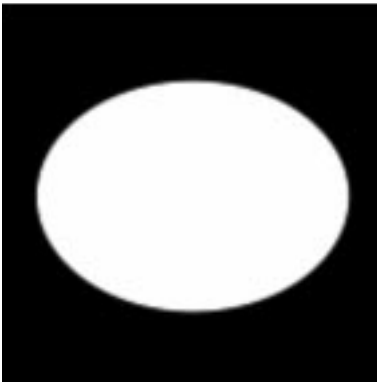


図5-7 表5-1に示す楕円ファントムの線減弱係数分布

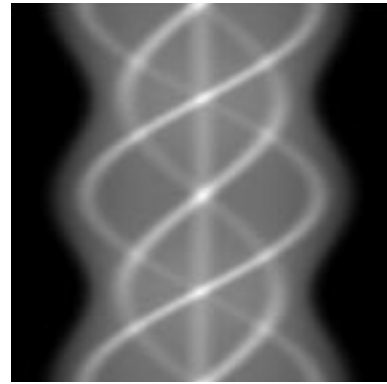


図5-8 図5-2に示した楕円ファントムの画像から作成した検出器特性を考慮した投影データ

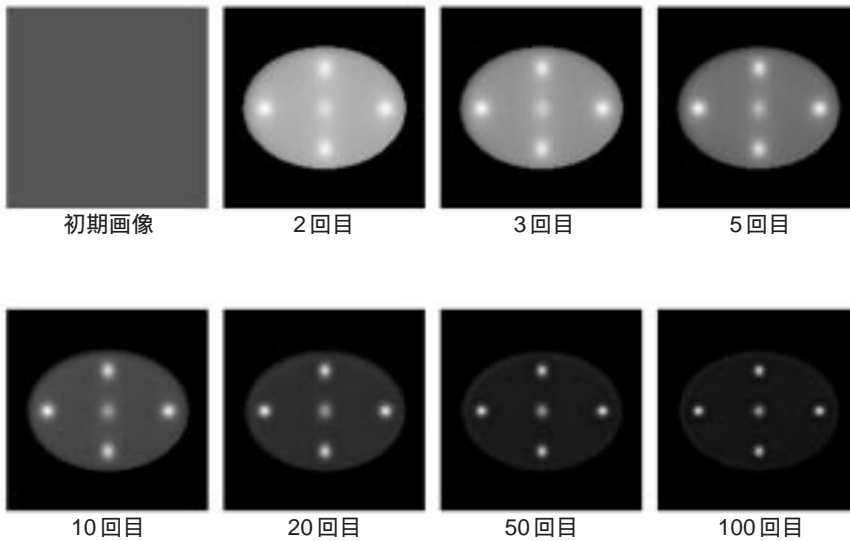


図5-9 深さに依存する検出器特性の補正を加えたML-EM法における初期画像から100回目までの繰り返しの途中画像

〔第4節〕 ML-EM法とOS-EM法への組み込み

ML-EM法とOS-EM法で用いられる検出確率 C_{ij} は本来、点線源（正確には1ピクセルのみにRIが存在する場合）に対する検出器のレスポンスに一致する．よって、あらかじめ点線源で点広がり関数を測定しておいて、これを C_{ij} とすれば分解能補正ができることになる．ただし、SPECTの場合は、コリメータからの距離によって分解能が変化してしまうので、これを考慮する必要がある．前節で、距離によって分解能を変化させるように検出確率を計算し、投影データを作成した．その検出確率をそのままML-EM法とOS-EM法に適用すれば、深さに依存する検出器特性を補正することができる．

深さに依存する検出器特性の補正を組み込んだML-EM法のプログラムを、プログラム5-5に示す．また、そのML-EM法を実行するプログラムをプログラム5-6に示す．図5-3bに示した検出器特性を考慮した楕円データからの投影データを用いて、ML-EM法で再構成した画像を図5-9に示す．初期画像と繰り返しの回数が2, 3, 5, 10, 20, 50, 100回の画像を並べて表示している．また、深さに依存す