

# 散乱線測定を導入した X 線 CT に関する研究

長江 大地

指導教員：戸田 尚宏

## 1 はじめに

X 線 CT (X-ray Computed Tomography) は、X 線源と検出器を人体の断面に沿って回転させ、測定された X 線透過強度から計算機によって物体の断面画像を再構成する医療画像診断装置である [1]。X 線 CT の再構成において、散乱線は再構成上にアーティファクトを発生させる要因とされている。そのため、散乱線成分を取り除くことを目的とする様々な除去機構や補正法などが提案、実装されている。

しかし、散乱線は対象物体が無ければ発生しないため、少なくとも対象物体の存在に関する情報を有しており、その利用により対象物密度の推定精度向上が期待できる。さらに、同程度の再構成画質を得る状況下においては、被ばく線量を低減できる可能性を秘めている。しかしながら、これまでに直接線に加えて散乱線を用いて再構成を行う方法やその精度に関して検証する研究はほとんどなされていない。

これに対し、中神ら [2] は、均質な細円柱状の物体が持つ単一の減弱係数を直接線と散乱線から推定するという極めて単純化された体系上で、散乱線利用に関する有効性を理論的に証明し、数値実験により検証した。しかし、より複雑な対象物体、特に、回転走査を必要とする体系上では検証されていない。

本論文では、新たな再構成手法を構築するために、直接線に加えて散乱線を測定することにより、再構成精度が向上する例の存在を示すことを目的とした。そこで、異なる複数の密度から構成される簡単な物体を対象として、回転走査を含んだコーンビーム X 線 CT の構造を可能な限り保存した簡略化モデル体系を計算機上で構築し、モンテカルロシミュレーションを用いた数値実験により、直接線のみを用いて再構成を行う従来法と直接線と散乱線の両方を用いる提案法の再構成精度を比較検証した。

## 2 シミュレーションモデル体系

ここでは、数値実験を行うためのシミュレーションモデル体系を構成する各要素について説明する。

### 2.1 X 線管

照射する X 線のエネルギーは  $70[\text{keV}]$  の単色とし、ビームの形状は回転を考慮した場合に物体全体に照射される広がりを持つコーンビームとする。

### 2.2 対象物ファントム

対象物ファントムの体系は、図 1 のように配置し、対象物ファントムはそれぞれ 4 つの密度パラメータ  $\rho_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) を持つ。対象物ファントムの密度は、X 線 CT の再構成において求める減弱係数と本質的に等価であるため、シミュレーションにより、この 4 つの密度パラメータを推定することで再構成を行う。

### 2.3 検出器及び投影データ収集

検出器にはヨウ化ナトリウム (NaI) のシンチレーション検出器を想定し、散乱 X 線を可能な限り測定するために、物体を覆うように直接線検出器と散乱線検出器を配置する。

まず、直接線のみを用いる従来法モデルの体系を図 2 に示す。直接線検出器の検出器アレイ 1 面の検出器数は  $8 \times 8$  の計 64 である。ただし、従来法モデルの場合、理想的なグリッドを各検出器に適用した状況を考慮し、直接線以外の対象物ファントムと相互作用した X 線はカウントしない。

次に、直接線と散乱線の両方を用いる提案法モデルの体系を図 3 に示す。従来法モデルで用いた直接線検出器に加え、散乱線検出器アレイを計 6 面配置する。この環境下において、検出器に到来した全 X 線光子を計測し、対象物ファントムの密度推定に用いる。

また、回転走査は  $40^\circ$  毎に行い、計 9 回 (以下、この回数をビュー数と呼ぶ) データとなる検出光子数を計測する。

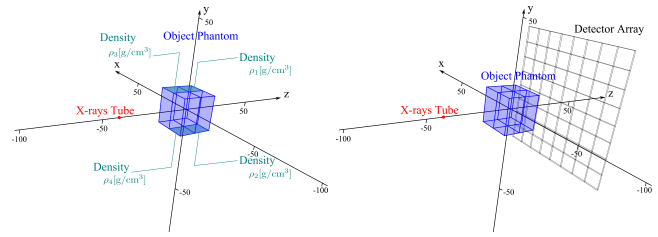


図 1 対象物ファントム

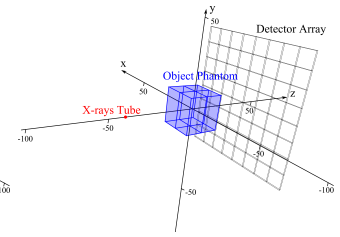


図 2 従来法モデルの体系

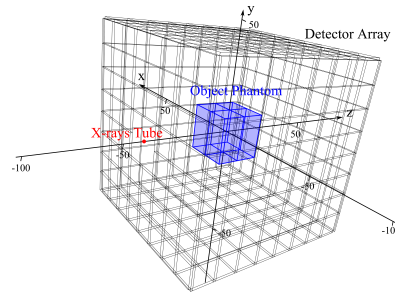


図 3 提案法モデルの体系

## 3 再構成法

仮想的にモデルから生成される投影データ (以下、仮想投影データと呼ぶ) を測定された投影データ (以下、測定投影データと呼ぶ) に近づけることで再構成を行うシミュレーション投影逐次近似法を基に再構成法を構築する。対象物ファントムの構成密度  $\rho_i$  を未知推定パラメータとして、これを種々変化させ、輸送計算させた仮想投影データの測定投影データに対する尤度が最も高くなる構成密度を推定値とする。各検出器で検出される X 線光子数は解析的に求めることが困難であるため、輸送計算には高エネルギー加速器研究機構により提供されている EGS5 [3] によるモンテカルロシミュレーションを採用する。最適化法には推定する密度のパラメータ数が 4 であるため、多次元方向集合法 [4] (以下、powell 法と呼ぶ) を用いる。

以下、推定密度パラメータの最適化における評価関数について説明する。今、X 線光子数  $I_p$  を照射した場合に測定される投影データとして得られた  $i$  番目の検出器における測定光子数を  $x_i$  とする。 $i(1 \leq i \leq I)$  は検出器の番号を表す添字である。ただし、回転角  $\theta$  の異なる投影データは独立に扱うため、投影データの次元  $i$  の最大値  $I$  は、検出器の数とビュー数によって定まる。また、測定投影データと同様に、仮想投影データ  $y_i^{(\rho)}$  は、密度  $\rho$  と照射 X 線光子  $I_r$  から得られる。

測定投影データに仮想投影データを近づける基準は、 $x_i$  と  $y_i$  との間の近さの尺度であるため、対数尤度を採用することが望ましい。しかし、実際の状況下において、厳密な対数尤度を導出することは極めて困難であるため、擬似的な対数尤度を使用する。統計的方法においては、対象物ファントムの各点から放出され、検出器に入射する光子の数はポアソン分布に従うものとして扱うことができる [1]。したがって、 $\lambda_i$  を  $i$  番目の検出器におけるポアソンパラメータとした場合に、全ての検出器における測定値が互いに独立であるという近似を導入し、ポアソン分布の同時確率関数の対数を取り、定数項を無視した対数尤度関数

$$L(\lambda_i | x_i) = \sum_{i=1}^I \{-\lambda_i + x_i \log(\lambda_i)\} \quad (1)$$

を評価関数とし、この値が最大となるパラメータへ最適化する。

ここで、シミュレーション投影逐次近似法のパラメータ推定を行うためには、 $\lambda_i$  を決定する必要がある。与えられた  $\rho$  に対

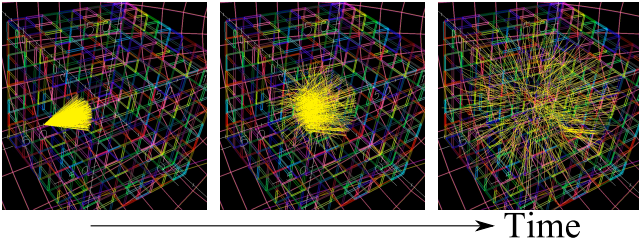


図 4 EGS5 輸送シミュレーションによる X 線光子の飛跡

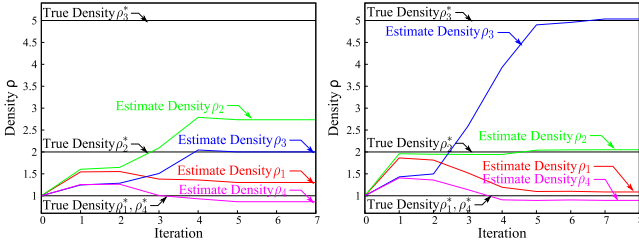


図 5 従来法による推定値推移

図 6 提案法による推定値推移

して、 $\lambda_i$  の推定値として以下の  $\hat{\lambda}_i(\rho)$ :

$$\hat{\lambda}_i(\rho) = y_i^{(\rho)} \frac{I_p}{I_r} \quad (2)$$

を用いる．式 (2) の  $\hat{\lambda}_i(\rho)$  を式 (1) の  $\lambda_i$  に代入することで、測定投影データと仮想投影データの近さを尤度基準で評価することができる．また、 $I_r$  はコンピュータの計算能力に応じ、可能な限り大きい方が好ましい．

#### 4 密度推定シミュレーション

ここでは、直接線のみを用いる従来法と直接線と散乱線を用いる提案法の両方による、密度パラメータ  $\rho_i$  の推定結果を比較する．密度推定シミュレーションの条件は、測定投影データ取得時に照射する X 線光子数  $I_p = 1.0 \times 10^5$ 、仮想投影データ取得時に照射する X 線光子数  $I_r = 1.0 \times 10^5$ 、真の密度パラメータ  $\rho_1^* = 1.0$ 、 $\rho_2^* = 2.0$ 、 $\rho_3^* = 5.0$ 、 $\rho_4^* = 1.0$  [g/cm<sup>3</sup>]、及び、推定値の密度パラメータの初期値  $\rho_i' = 1.0$  [g/cm<sup>3</sup>] とする．

図 4 は、EGS5 輸送シミュレーションによる X 線光子の飛跡 (黄線) の例である．X 線管から照射された X 線光子は、対象物ファントムと相互作用し、直接線検出器と散乱線検出器で検出される．本論文の提案法は、従来法では検出不可能な散乱 X 線光子の情報を 3 次元的に取得し、有効利用することで従来法より良い推定精度を達成できることを検証する．

図 5 は従来法、図 6 は提案法によって推定された密度パラメータ  $\rho_i$  の推定アルゴリズムの反復回数に関する推移をそれぞれ示している．図中、真の密度  $\rho_i^*$  を黒線、推定密度パラメータ  $\rho_i$  を色線で示している．

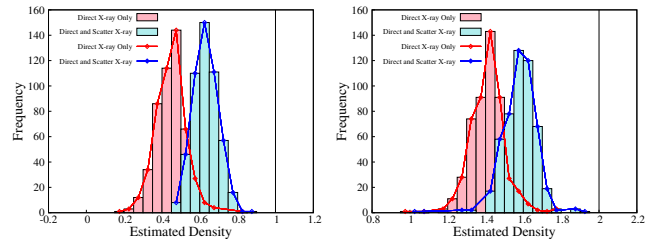
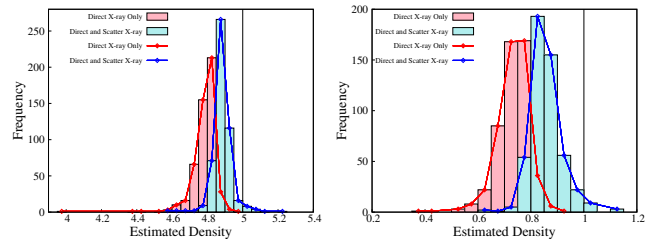
結果から、特に、推定密度パラメータ  $\rho_3, \rho_4$  の提案法の収束値が、従来法より真に近いことが判る．そこで、真の密度パラメータ  $\rho_i^*$  と収束時点での密度パラメータの推定値  $\rho_i$  との誤差を式 (3) の Error:

$$Error = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (\rho_i^* - \rho_i)^2} \quad (3)$$

によって定量的に計算すると、従来法は  $Error = 1.553130$ 、提案法は  $Error = 0.076792$  と従来法に比べ、提案法の方が対象物ファントムを構成する密度パラメータの推定精度が高いことが確認できる．

#### 5 推定密度の再構成精度

ここでは、前節の数値実験を多数回試行し、従来法と提案法による再構成精度を統計的に比較する．ここでの統計評価においては、照射する X 線光子数の少ない状況において、散乱線測定の効果を確認するため X 線光子数  $I_p = 2.0 \times 10^2$  とする．

図 7 密度  $\rho_1$  のヒストグラム図 8 密度  $\rho_2$  のヒストグラム図 9 密度  $\rho_3$  のヒストグラム図 10 密度  $\rho_4$  のヒストグラム

また、データによって評価関数の最大を与えるパラメータ値は、一般的に真とは異なるが、その値が真に近いことが、精度の向上に寄与しているため、ここでは、両方法共に初期値として真の値を設定し、収束後の状態で比較を行う．異なる乱数パラメータによる測定データを 500 組生成し、それぞれに対して推定を行う数値実験を行った．

500 回の試行から得られた推定密度  $\rho_i$  を、推定密度  $\rho_i$  毎にヒストグラムとして示したものが図 7 ~ 10 である．図 7 ~ 10 の横軸は推定密度  $\rho_i$  の値、縦軸は度数を示している．真の密度  $\rho_i^*$  は黒線であり、従来法により得られたヒストグラムを赤色、提案法により得られたヒストグラムを青色で示している．

従来法より従来法の方が推定値ヒストグラムが真の密度  $\rho_i^*$  に近く、より再構成精度が高く対象物ファントムが持つ密度を推定できていることが確認できる．

#### 6 おわりに

本研究では、これまで検証されて来なかった複数の推定パラメータを持つ対象物ファントムを構築し、モンテカルロシミュレーションと powell 法を用いたシミュレーション投影逐次近似法により、その再構成精度を直接線のみを用いる従来法と直接線と散乱線を用いる提案法との間で統計的に比較検証した．従来法よりも提案法の方が数値的にも推定精度が高く、真の値と収束時点における推定値との誤差が小さくなることを多数の試行により統計的に示した．特に、散乱線が多く発生するような対象物を想定する場合には、散乱線測定を導入した X 線 CT の優位性を示すことができた．また、本論文のモデル体系において、従来法の再構成精度を提案法と同程度の値にするためには、測定投影データを取得する際に照射する X 線光子数  $I_p$  を増やす必要がある．すなわち、被ばく線量を高くしなければならない．このことから、直接線に加えて散乱線の情報を利用することにより被ばく線量を低減できると考えられる．

今後の課題としては、モデル体系の拡張や精細化、膨大な計算量や計算時間の解決、さらに、コンプトン散乱などの相互作用に関する物理的特性の利用など、多角的に散乱線から得られる情報を利用するための方法論を考えていく必要がある．

#### 参考文献

- [1] J. Hsieh, Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts and Recent Advances, SPIE Press, Bellingham, 2003.
- [2] T. Nakagami et al, Use of Scattered X-Rays for the Estimation of the Attenuation Coefficient, High Energy Accelerator Research Organization, KEK Proceedings, pp.11-16, 2015.
- [3] H. Hirayama et al, The EGS5 code system, report 2005-8, High Energy Accelerator Research Organization, 2009.
- [4] W. H. Press et al, Numerical Recipes in C, pp.412-419, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, ISBN 0-521-43108-5, 1996.