

# 散乱線測定を導入した Dual-Energy X 線 CT に関する研究

近藤 尚弥

指導教員：戸田 尚宏

## 1 はじめに

X 線 CT (Computerized Tomography) において散乱線は、不要なものとされ除去されてきた。しかしながら、物体がなければ散乱線は生じないことを考えると散乱線にも物体の情報が含まれているはずである。この観点から Toda ら [1] 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、X 線源から単色のエネルギーが照射されていると仮定したもとで散乱線利用に関する有効性を理論的に証明し、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検証した。その後、Nagae ら [2] によって、より複雑な対象物体、特に、回転走査を必要とし、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において、X 線源から単色のエネルギーが照射されていると仮定したもとでのモンテカルロシミュレーションを用いた数値実験で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により、推定精度が向上することを示した。

しかし、一般に X 線 CT では照射される X 線が、幅広いエネルギースペクトル分布を有するマルチエネルギーである。減弱係数はエネルギーごとに異なるため、各エネルギーに散乱線の影響を考慮する必要がある。エネルギー情報を利用するうえで効率的な方法として、Alvarez ら [3] により提案された、Dual-Energy (以下、DE) 法が普及し始めている。これは、医療診断分野における X 線においては、減弱係数が光電効果とコンプトン散乱の 2 つの要素で概ね記述できることを利用した手法である。

そこで、本研究の目的は、Toda ら [1] と Nagae ら [2] の構築した二つの体系において、モンテカルロシミュレーションによる数値実験をマルチエネルギーにおいても行えるように拡張し、散乱線利用の可能性を示すことである。

## 2 Dual-Energy 法

医療用 X 線 CT において、主な相互作用として、コンプトン散乱、光電吸収があり、DE 法では、減弱係数  $\mu(\varepsilon)$  をそれらの二つの相互作用の線形結合で表す。今、光電吸収に関するパラメータを  $\alpha$ 、コンプトン散乱に関するパラメータを  $\beta$  とし、それぞれ光電吸収係数、コンプトン散乱係数と呼び、減弱係数  $\mu(\varepsilon)$  を次式で表す [3]。

$$\mu(\varepsilon) = \alpha X_1(\varepsilon) + \beta X_2(\varepsilon) \quad (1)$$

## 3 簡略化したモデル体系

ここでは、数値実験を行うための簡略化したモデル体系を構成する各要素について説明する。

### 3.1 X 線エネルギー

照射する X 線のエネルギーは図 1 の二つのエネルギースペクトルをもつマルチエネルギーとし、従来の Dual-Energy 法を利用した撮影法では、図 1 の二つのエネルギースペクトルを使用し、散乱線を取得し利用する提案法では図 1 のうち赤線のエネルギースペクトルを使用する。ビームの形状はペンシルビームとする。

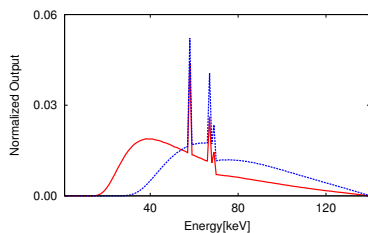


図 1 エネルギースペクトル

### 3.2 対象物ファントムと検出器

対象物ファントムの体系は、ここでは [1] にならい、図 2 の均質細シリンダモデルを用いる。検出器は散乱 X 線を可能な限り測定するために、物体を覆うように  $k$  個の円筒形  $NaI$  検出器 (以下、散乱線検出器) を配置する。また、直接線のみを測定する  $NaI$  検出器 (以下、直接線検出器) は、X 線管、均質細シリンダ、直接線検出器の順に、一直線上に配置する。また、物体は水を基準として、その密度を  $1.5[g/cm^3]$  とした。この時の光電効果係数  $\alpha$  とコンプトン散乱係数  $\beta$  の 2 つの係数パラメータを推定することにより、対象物ファントムが持つマルチエネルギーにおける各減弱係数の再構成を行う。

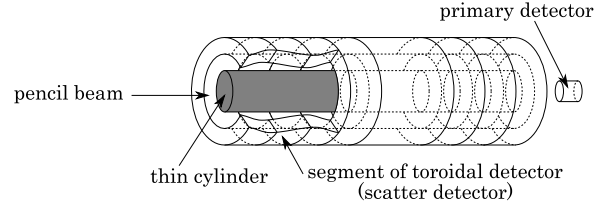


図 2 均質細シリンダの体系

### 3.3 再構成法

仮想的にモデルから生成される投影データ  $y_i$  (以下、再構成投影データと呼ぶ) を測定された投影データ  $x_i$  (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係数 ( $\alpha_k, \beta_k$ ) を未知推定パラメータとして、これを種々変化させ、輸送計算させた再構成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係数を推定値とする。検出器に到達する光子数はボアソン分布に従うこと、及び全ての散乱検出器の測定値が近似的に独立であるという仮定に基づき、対数尤度関数を以下のように定める。

$$L(\lambda | D) = \sum_{i=1}^I (-m\lambda_i + x_i \log \lambda_i), \lambda_i = \frac{I_r}{I_p} y_i \quad (2)$$

ここで、 $I$  は使用するパラメータの総数、 $x_i$  は  $i$  番目の検出器における測定投影データ、 $I_r$  は再構成投影データの照射光子数、 $I_p$  は投影データの照射光子数であり、 $\lambda_i$  は  $i$  番目の検出器におけるボアソンパラメータであり、再構成投影データと測定投影データのスケールを合わせるために各照射光子数をかけたものを用いる。

### 3.4 実験条件

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係数  $\alpha, \beta$  の推定結果を比較する。提案法において散乱線検出器数は 1~10 個とする。測定投影データ取得時に照射する X 線光子数  $I_p = 1.0 \times 10^5$ 、再構成投影データ取得時に照射する X 線光子数  $I_r = 1.0 \times 10^7$ 、真の係数を  $(\alpha, \beta) = (0.0501, 0.1251)$ 、及び、推定値の係数パラメータの初期値と推定誤差を  $(\alpha', \beta') = (5.0, 8.0)$ 、 $(\Delta\alpha', \Delta\beta') = (3.0, 5.0)$ 、試行回数  $M_{mc}$  を 1000 回とする。

### 3.5 実験結果

このシミュレーションでは、バイアス誤差が含まれる可能性があるため、評価は以下の式により求める。ここで、 $\mu^*(\varepsilon)$  は真のエネルギー減弱係数、 $\hat{\mu}^i(\varepsilon)$  は  $i$  番目の推定エネルギー減弱係数  $I_0^*(\varepsilon)$  が図 1 のうち赤線のエネルギースペクトルにおける正規化された各エネルギーごとの照射光子数、 $M_{mc}$  は試行回数である。

$$Err = \sqrt{\frac{1}{M_{mc}} \sum_{i=1}^{M_{mc}} \int_{\varepsilon_l}^{\varepsilon_u} I_0^*(\varepsilon) (\mu^*(\varepsilon) - \hat{\mu}^i(\varepsilon))^2 d\varepsilon} \quad (3)$$

散乱検出器  $k$  に関する Err の値を図 3 に示す。

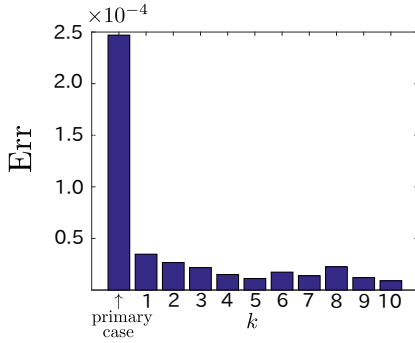


図 3 Err

従来法より提案法の方が、より再構成精度が高く対象物ファントムが持つ係数を推定できていることが確認できる。

## 4 回転走査を考慮したモデル体系

### 4.1 X 線のビーム形状とエネルギー

同様に従来法では図 1 の二つのエネルギースペクトルを使用し、散乱線を取得し利用する提案法では図 1 のうち赤線のエネルギースペクトルを使用する。ビームの形状はファン角  $36.0^\circ$ 、コーン角  $24.0^\circ$  のコーンビームとする。

### 4.2 対象物ファントムと検出器

対象物ファントムは、4 個の直方体を集めた立方体として図 4 のように配置し、対象物ファントムは合計 8 つの係数パラメータ  $(\alpha_i, \beta_i) (i = 1, 2, 3, 4)$  を持ち、物体は水を基準として、その密度を変化させてこれに対応する係数に変化を持たせたものである。シミュレーションによって、この 8 つの係数パラメータを推定することにより、対象物ファントムが持つマルチエネルギーにおける各減弱係数の再構成を行う。

また、検出器は散乱 X 線を可能な限り測定するために、物体を覆うように図 5 のように直接線検出器と散乱線検出器を配置する。正面検出器と側面検出器の検出器アレイ 1 面の検出器数は  $8 \times 8$  の計 64 であり、背面検出器の検出器アレイ 1 面の検出器数は X 線管が配置される場所を除いた 60 である。従来法モデルでは、この図の正面検出器のみを利用し、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。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係数推定に用いる。

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。

### 4.3 実験条件

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係数  $\alpha, \beta$  の推定結果を比較する。今回は、対象物体の減弱係数が一般的な場合、減弱係数が低い物質がある場合、減弱係数が高い物質がある場合の 3 つのシミュレーションについて比較する。測定投影データ取得時に照射する X 線光子数  $I_p = 1.0 \times 10^5$ 、再構成投影データ取得時に照射する X 線光子数  $I_r = 1.0 \times 10^7$ 、真の係数を表 1 (各係数は表の数値に対し  $(\times 10^{-2})$  した値とする。) とし、及び、推定値の係数パラメータの初期値と推定誤差を  $(\alpha', \beta') = (3.0, 5.0), (\Delta\alpha', \Delta\beta') = (5.0, 15.0)$  とする。

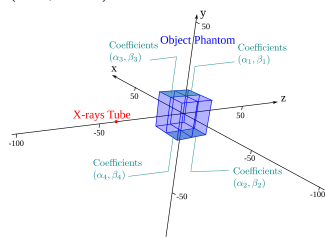


図 4 対象物ファントム

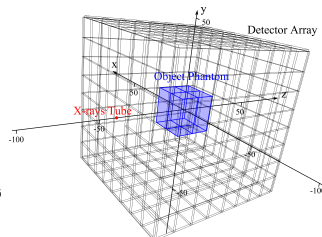


図 5 BOX 型モデルの体系

係数	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\alpha_3$	$\beta_3$	$\alpha_4$	$\beta_4$
case1	3.34	8.34	6.69	16.7	3.34	8.34	5.01	12.5
case2	1.67	4.17	3.34	8.34	5.01	12.5	6.69	16.7
case3	3.34	8.34	6.69	16.7	3.34	8.34	16.7	41.7

表 1 真の係数パラメータ

### 4.4 実験結果

このシミュレーションにおいても均質細シリンダモデル同様に、バイアス誤差が含まれる可能性があるため、評価は以下の式により求める。ここで、 $\mu^*(\varepsilon)$  は真のエネルギー減弱係数、 $\hat{\mu}^{(i)}(\varepsilon)$  は  $i$  番目の推定エネルギー減弱係数  $I_0^*(\varepsilon)$  が図 1 のうち赤線のエネルギースペクトルにおける正規化された各エネルギーごとの照射光子数である。

$$Err = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \left( \int_{\varepsilon_l}^{\varepsilon_u} I_0^*(\varepsilon) \left( \mu^*(\varepsilon) - \hat{\mu}_k^{(i)}(\varepsilon) \right)^2 \right)} \quad (4)$$

各シミュレーションから得られた Err は以下の通りである。

表 2 Err

手法	case 1	case 2	case3
従来法	$8.8585 \times 10^{-2}$	$3.1433 \times 10^{-2}$	$1.9371 \times 10^{-1}$
提案法	$7.3832 \times 10^{-2}$	$2.8718 \times 10^{-2}$	$1.9696 \times 10^{-2}$

どの case においても従来法よりも提案法のほうが減弱係数の推定精度が良い。減弱係数は高いほど物体を通過する直線線の量は減り、散乱線の量は多くなる。そのため対象物体に減弱係数の高い物質がある case3 においては散乱線情報を利用する提案法がより効果的な結果となったと考えられる。

## 5 おわりに

本研究では、Toda ら [1] と Nagae ら [2] によって検証された数値実験をマルチエネルギーにおいても検証できるようにモデルを拡張し、モンテカルロシミュレーション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比較検証した。従来法よりも提案法の方が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対象物体の減弱係数を変えた 3 つのシミュレーションにおいて示した。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くてはならない。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、対象物体の構成要素を増やしたり検出器の数や回転走査を増やし、より複雑な体系において検証していく必要がある。また、本論文ではレイリー散乱が発生しない利用的な状況下での実験だったため、レイリー散乱を含めた実験を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] N.Toda, T.Nakagami, Y.Yamazaki, H.Yoshioka, S.Koyama. "IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences," (2018).
- [2] D.Nagae "散乱線測定を導入した X 線 CT に関する研究 (2017)"
- [3] R.E Alvarez and A.Macovski, "Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography," pp.733-744 (1976).