

コリメートされた散乱線を利用する X 線 CT に関する研究

広羽 健太

指導教員：戸田 尚宏

1 はじめに

X 線 CT (X-ray Computed Tomography) は、近年コーンビーム化へと進んでおり、コーン角の増加に伴い散乱線の含有割合も大きく増加している。散乱線は、再構成像上、アーティファクトを発生させる大きな要因となるので、X 線画像診断装置においては古くからグリッドと呼ばれる散乱線除去機構が用いられている。しかし、散乱線は入射 X 線と対象物の相互作用によって生じるものであることから、散乱線にも対象物の情報が含まれている。従って、散乱線を用いることで、再構成画像の画質を向上できると考えられ、同じ画質を得るのであれば、現在より被曝を減少させられる可能性がある。これらの点を明らかにするため、竹本 [1] らは、散乱線を考慮した逐次近似再構成法を提案したが、必ずしも従来法以上の結果を得られる訳ではないことを中神 [2] の先行研究の検証により示された。これに関して中神 [2] は、散乱線の情報を十分に利用できていないことを指摘し、簡略化したモデル上で投影シミュレーションを行い、散乱線利用の有効性を示唆した。検出器に到達するすべての方向からの散乱線を用いる方法も考えられるが、最適化の計算を必要とするため、現時点では実用的なサイズの再構成は困難である。

そこで、本研究では、実際の X 線 CT 体系を考慮し、グリッドによって散乱線をコリメートし、到来方向を限定するような散乱線源の特定が可能な体系モデルを考案した。この体系を用いて散乱線を用いた再構成を行う方法を提案し、数値実験により散乱線による断層像の再構成の可能性を示す。また、散乱線による再構成結果から得られた情報を従来法による再構成結果に加える手法を提案し、再構成精度の向上の可能性を検証する。

2 散乱 X 線コリメーション

実際の X 線 CT 体系を考慮した散乱線利用モデルの体系として、従来から用いられている直接線のみを検出を目的とした検出器 (直接線検出器と呼ぶ) に加えて、図 1 のようにグリッドを備えた検出器 (散乱線検出器と呼ぶ) を対象物の両側方に配置する。

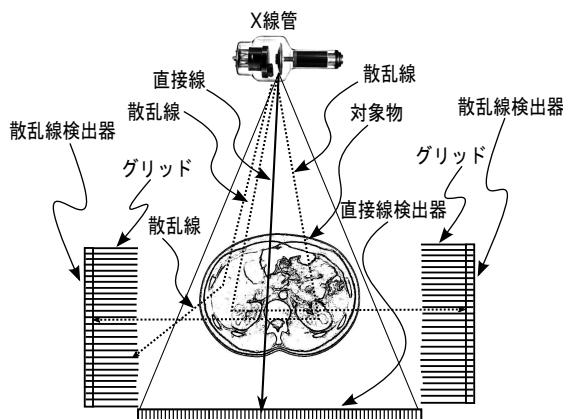


図 1 提案法体系

この体系では、図 2 のように散乱線検出器に対して垂直な方向から到来する散乱線のみをコリメートすることで散乱線源の特定が可能となる。したがって、直接線検出器に対して X 線源から対象物体を直線的に透過してくる X 線光子のみを検出することで対象物体の構成を計算し、断層像の再構成を行っている従来の方法と同様に、散乱線検出器に対して散乱線源から垂直に到来する散乱 X 線を用いることで、検出した光子数によって構成される投影データから断層像を逆投影法する FBP (フィルタ逆投影法) を適用が可能となる。これによって、散乱線を用いた断層像の再構成を行う。本研究では、この方法を提案法とする。

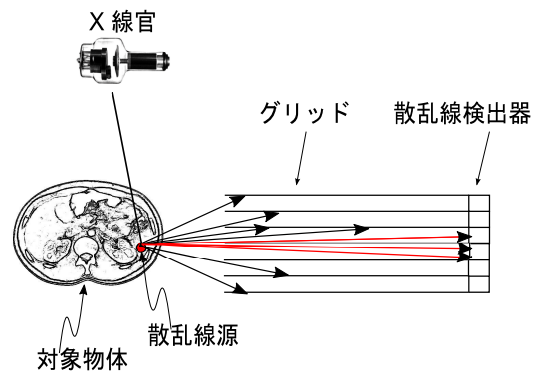


図 2 散乱線の到来方向の限定

3 グリッド長の変化による再構成の性能変化

散乱線検出器に備えたグリッド長が大きい場合、散乱線源の方向は特定されるが検出器全体の到来光子数が減少するため、量子雑音が増加すると考えられる。一方グリッド長が小さい場合、到来光子数が増加するため、量子雑音は減少するが散乱線源の位置の特定が曖昧になるため、再構成結果にボケが生じると考えられる。これらはトレードオフの関係にあるため、コリメートされた散乱線のみによる断層像再構成の可能性を、EGS5 を用いたモンテカルロ法による投影シミュレーションによりグリッド長が大きい場合、小さい場合の再構成精度を比較する。

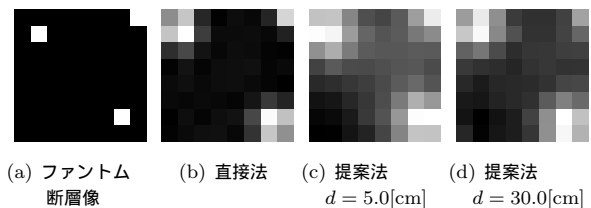


図 3 再構成結果

均質な棒状の直方体を単位とし、これを 8×8 の正方領域に束ねたものを対象物体 (ファントム) とする。図 3(a) の白色で示された位置の直方体に密度 $4.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ の骨を、その他の直方体には密度 $0.01[\text{g}/\text{cm}^3]$ の水を配置し、これに 4.0×10^6 個の光子によるコーンビームを照射した。図 3(b) に直接線のみを用いた現行の CT 再構成法 (以下直接法と呼ぶ) による断層像の再構成結果、図 3(c), (d) に提案法によるグリッド長 d を変化した断層像再構成結果を示した。グリッド長が小さい ($d = 5.0[\text{cm}]$) 場合、グリッド長が大きい ($d = 30.0[\text{cm}]$) 場合、どちらも骨の

位置の特定ができていないが、グリッド長が小さい場合は水の部分がぼやけており、水と骨の区別が曖昧であることが確認できる。一方グリッド長が大きい場合、直接法の結果に近づくことが確認できる。これらの結果から、コリメートされた散乱線のみから断層像再構成が可能であることがわかる。

4 散乱線利用による再構成の評価

散乱線を用いることによる画質の評価方法として、再構成結果の推定値の散らばり(分散)度合いによって評価を行う。

散乱線情報を用いるため、提案法から得られた散乱線のみによる断層像の再構成結果と従来法である直接線のみによる断層像の再構成結果を、ブレンド係数 $\lambda (0 \leq \lambda \leq 1)$ を用いて次式のように統合する。このとき、 (x, y) を再構成画像のピクセル座標とし、 R_λ を各 λ における直接線と散乱線の統合時の再構成結果、 d を直接線の再構成結果、 s を散乱線の再構成結果とする。

$$R_\lambda(x, y) = (1 - \lambda) \cdot d(x, y) + \lambda \cdot s(x, y) \quad (1)$$

式 1 の各 λ においてファントム中の減弱係数が一定な部分において推定画像の標準偏差を σ 、減弱係数の高い部分の平均値を r とする。評価基準を F とし、標準偏差 σ を r によって式 2 のように規格化を行う。

$$F = \frac{\sigma}{r} \quad (2)$$

λ が 0 のときは直接線のみによる再構成画像が $R_\lambda(x, y)$ となる。このときの F の値に対して、 λ を増大させた際、すなわち散乱線による再構成画像を加えることにより、 F の値が減少するならば散乱線を用いる効果があったと判断できる。また、 F の最小値を与える λ が散乱線を用いる上での最適なブレンド値であると言える。

5 散乱線情報の付加による再構成精度

グリッド長が大きい方が散乱線を用いた断層像の再構成結果が直接法の結果に近づくことから、グリッド長を $d = 30.0[\text{cm}]$ として X 線照射光子数を $4.0 \times 10^6, 8.0 \times 10^6$ と変化させた場合とグリッド長を $d = 100.0[\text{cm}]$ 、X 線照射光子数を 2.0×10^7 の場合における散乱線情報を直接法の結果と統合したときの再構成精度の検証を行う。

使用するファントムを図 3(a) として、各条件における直接法と提案法の断層像の再構成結果を式 (1) にしたがって統合し、各 λ における式 (2) で導出される評価基準によって F を観測したところ、いずれの場合においても分散が最小値を取るような λ が存在した。ここでは、グリッド長 $d = 100.0[\text{cm}]$ 、X 線照射光子数 2.0×10^7 の場合での各 λ における F の値を示す。

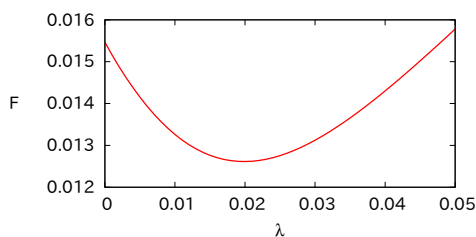


図 4 グリッド長 $d = 100.0[\text{cm}]$ 、X 線照射光子数 2.0×10^7

この場合 散乱線による再構成結果を用いることで、 $\lambda = 0.02$ で最小となり画像上の値の散らばりが直接線のみするときより減少したことが確認できる。また、グリッド長 $d = 30.0[\text{cm}]$ 、X 線照射光子数 $4.0 \times 10^6, 8.0 \times 10^6$ の場合においても同様な結果が得られた。

各場合における、最小値を取るときの λ の値、評価基準 F の最小値は、それぞれ以下の表 1 のようになった。

表 1 各条件における最小値取得時の詳細

グリッド長, X 線照射光子数	λ 値	F の最小値
30.0[cm], 4.0×10^6	0.0120	0.0140589260
30.0[cm], 8.0×10^6	0.0190	0.0127928284
100.0[cm], 2.0×10^7	0.0200	0.0126137780

表 1 から、同じグリッド長において X 線照射光子数が大きい場合 (8.0×10^6) は、小さい場合 (4.0×10^6) と比べて、最小値を取るときの λ の値が大きくなっていることがわかる。これは、散乱線による再構成結果を直接法による再構成結果との統合時に多く利用したことを示している。また、グリッド長、X 線照射光子数のどちらも大きくした場合は、さらに最小値を取るときの λ の値が大きくなっていることがわかる。

グリッド長 $d = 100.0[\text{cm}]$ 、X 線照射光子数 2.0×10^7 の場合における直接線と散乱線の統合前の再構成結果と分散が最小となるときの統合時の再構成結果を図 5 に示す。

これらのことから、効率的なアルゴリズムを利用するためにコリメートされた散乱線情報を従来の方法によって得られる再構成結果に付加することで、断層像の再構成精度が向上し、散乱線源の特定精度の高い散乱線を利用するほど、散乱線情報の有効性が高まると考えられる。

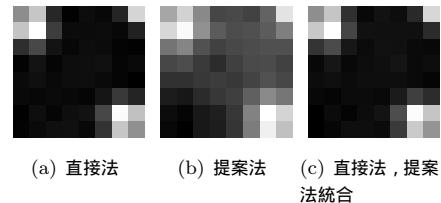


図 5 再構成結果

6 おわりに

本研究では、コリメートされた散乱線のみを用いる体系と断層像の再構成法を示した。また、その手法から得られる再構成結果の情報を現行 X 線 CT で用いられている直接法による再構成結果に統合するように付加することで、直接線のみを用いる従来法より再構成精度が向上することを確認し、X 線 CT における散乱線の有効利用性を示した。

今後は、実際の X 線 CT への導入を想定した再構成精度の向上が得られるような散乱線の利用手法の追求が必要である。また、本研究においてコリメートすることで除去された散乱線に関して有効利用が可能な方法の検討が課題となる。

参考文献

- [1] 竹本 和馬, 他, 信学技報, MBE2013-78, pp.15-18(2013).
- [2] 中神 徹也, 他, 信学技報, MBE2014-127, pp.63-68(2015).