

## X線 CT 画像再構成における端部効果によるアーチファクトの削減

小尾 高史・三村 昌弘・曾我 峰樹・山口 雅浩・大山 永昭

東京工業大学像情報工学研究施設 〒226 横浜市緑区長津田町 4259

### New X-Ray CT Image Reconstruction Method for Reduction of an Edge Effect Artifact

Takashi OBI, Masahiro MIMURA, Mineki SOGA, Masahiro YAMAGUCHI and Nagaaki OHYAMA

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259, Nagatsuta-cho Midori-ku, Yokohama 226

The filtered backprojection (FBP) method, which is widely used to reconstruct images in X-ray computed tomography (CT), does not take into account the property of the actual imaging system such as the diverging X-ray beam. Accordingly reconstructed images by the FBP method include errors due to the inaccurate modeling of a projection system and the errors give rise to an artifact called an edge effect. In this paper, we use a correct model of an actual projection system correctly and propose a reconstruction method using a new filter; we use a projection system based on a continuous-discrete model and apply GARDS (generalized analytic reconstruction from discrete samples) which is the reconstruction technique based on a continuous-discrete model. The efficiency of the proposed method is demonstrated using simulated data and the results show that the artifacts caused by edge effect are reduced.

#### 1. はじめに

近年、X線 computed tomography (CT) を用いた三次元 CT 画像の生成が容易に行われるようになってきた。三次元画像診断の高精度化には、回転軸方向の分解能を向上することが必要になるが、そのためにはシステムの特性を考慮した再構成手法の利用が有効と考えられる。現在用いられている X線 CT 装置では、画像再構成手法として、filtered backprojection (FBP) 法や FBP 法に基づく補間再構成法<sup>1,2)</sup> が広く用いられている。FBP 法では、投影データ、物体をとともに連続関数で取り扱う連続-連続モデルを用いてこれらの関係の定式化を行い、投影データが物体の物理量の線積分値になり、かつ回転軸方向の分解能が一定であるという仮定のもとに再構成フィルターを設計、および逆変換の導出がなされている。しかし現実の投影系においては、ディテクターに入射する X線ビームは回転軸方向に扇状に広

がっているため、Fig. 1 に示されるような構造物は投影方向によって検出される場合と検出されない場合とが生じる。その結果、回転軸方向に突起状や細かい構造をもつ物体が存在する場合には、FBP 法により得られる再生像にアーチファクトが生じることになる。特に、胸部撮影時における肋骨や頭部撮影時における耳小骨など、投影データが突起状の構造をもつ骨部の影響を受ける場合には、骨の CT 値が周辺部と比較し大きいことから、再生像に強いストリーク状のアーチファクトが生じる場合がある。この現象はしばしば端部効果 (edge effect, partial volume effect) と呼ばれるが、このようなアーチファクトは、再生像のコントラストの低下や患部の隠蔽を引き起こす原因となり、再構成画像の信頼性を著しく低下させるものとなる。

端部効果によるアーチファクトを低減させるには、対向する投影データを平均化する等の処理を加えた後に、FBP 法を用いて再構成を行う手法<sup>1,2)</sup> も考えられる。しかし、この手法では本来再生面上に存在しない物体を再

E-mail: obi@isl.titech.ac.jp

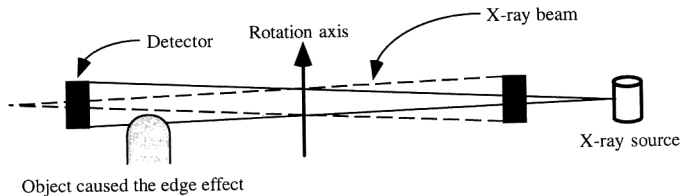


Fig. 1. An object cause the edge effect.

構成してしまう恐れがあり、また平均化により回転軸方向の分解能を劣化させることになる。

そこで本論文では、上記の問題点を解決し、回転軸方向の分解能を向上させ、再生像の画質を改善することを目的として、物体を連続関数で、投影データを離散系で取り扱う三次元連続-離散モデルを用いて X 線 CT 投影系を正確に三次元空間でモデル化し、システムの特性を正確に反映したフィルターを用いる三次元再構成手法を提案する。

そして、コンピューターシミュレーションにより、本手法を用いることで、回転軸方向の空間分解能の改善が可能であることを確認し、端部効果によるアーチファクトを低減できることを示す。

## 2. X 線 CT の投影系と再構成手法

### 2.1 X 線 CT の投影系と従来法の問題点

X 線 CT は、被検体に対して多方向から X 線を照射し、透過した後の X 線吸収率分布を再生する装置である。投影データの収集方法にさまざまなものがあるが、現在最も広く採用されている方式は、X 線源から射出された扇状の X 線ビーム（ファンビーム）を、被検査体を挟んで円弧状に対向して配置されたディテクターにより検出する方式である（Fig. 2 参照）。

この方式において再生像の空間分解能を向上させるためには、検出器の数を増やし、一つ一つの検出器の大きさ（開口幅）を小さくする必要がある。しかしフォトンゆらぎのために、開口幅を小さくすると投影データに含まれる統計雑音が増加し、S/N 比が低下する。このため、通常用いられるディテクターでは、再生面内の開口幅を小さくし、回転軸方向の開口幅を大きくすることで、再生面内の空間分解能を向上させ、かつ S/N 比を向上させている。しかしこのような投影系では、1つのディテクターに入射する X 線ビームは回転軸方向に扇状の広がりをもつことになるため、各ディテクターは回転軸方向に広がった感度分布関数をもつことになる。ここで感度分布関数とは、物体領域（物体空間）に対して

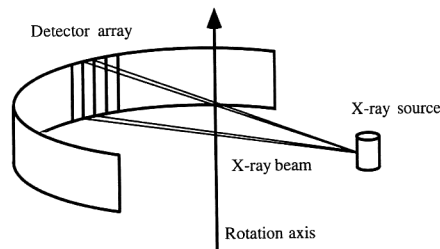
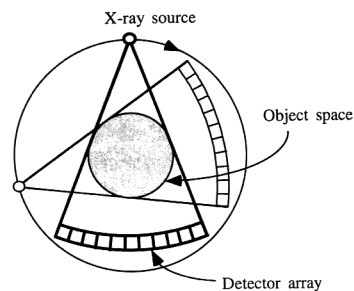


Fig. 2. Geometry of the rotate/rotate CT system.

ディテクターがもつ感度を表す関数であり、物体の存在領域や X 線ビームの広がり、ディテクターの指向性等の情報をもたせることができる。

FBP 法では、物体空間、観測空間ともに連続系で定義・モデル化を行い、これらの関係から再構成フィルターの設計を行わなければならない。このため、ディテクターの感度分布関数のように、観測データが離散的に得られることを用いて決定される関数を考慮して再構成を行うことは難しい。さらに、FBP 法を用いた再構成では、従来再構成の過程においてあまり問題とされることのなかった観測データ取得時のシステムと再構成時に仮定するシステムの差異により、再生像に含まれる誤差が増大する危険性がある。

### 2.2 ファンビーム投影系への GARDS の適用

前述したように、FBP 法は、連続-連続モデルに基づく手法であるため、ビームの広がりやディテクターの開

口等を考慮した投影系を正しくモデル化することが困難である。そこで本論文では、物体空間を連続系で、観測空間を離散系で定義した三次元連続-離散モデルを用いることにより投影系を正しく三次元空間でモデル化する。さらに再構成手法として、従来二次元画像再構成に用いられてきた連続-離散モデルに基づく手法である generalized analytic reconstruction from discrete samples (GARDS)<sup>3)</sup>を三次元に拡張し、X線CT再構成に対して適用する。三次元連続-離散モデルでは、X線ビームの回転軸方向の広がりや幅の情報をディテクターの感度分布関数として表すことができる。またGARDSは、回転軸方向に対して投影系のもつ伝達特性を最大限生かした再構成を行うことが可能である。したがって、X線CTのファンビーム投影系に対してGARDSを適用することにより、観測データ取得時のシステムの特性を正確に反映したフィルターの設計を行うこと、およびその結果現実の投影系に則したCT画像を再構成することが可能となる。以上より、本手法を用いることで、回転軸方向の分解能を向上させ、端部効果によるアーチファクトの低減を実現できると考えられる。

Fig. 3に三次元連続-離散モデルに基づくX線CTのファンビーム投影系のモデルを示す。本来のX線源の焦点は有限の大きさをもっているが、ディテクターの開口幅に比べ十分小さいため、ここでは点と仮定する。また、物体空間の定義領域は円筒物体 $\nu$ 内とする。

まずはじめに、ディテクターの感度分布関数を求める。 $i$ 番目のディテクターは、点線源からディテクターの開口を見込む領域内で感度をもつため、 $i$ 番目のディテクターの感度分布関数の形状はFig. 3に示すように四角錐状のものとなる。X線源の位置を $\mathbf{r}_s$ で表すと、物体領域内の点 $\mathbf{r}$ での感度分布関数 $h_i(\mathbf{r})$ は

$$h_i(\mathbf{r}) = \frac{1}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s\|^2} \quad (1)$$

となる。ここで感度分布関数は、X線ビームの回転軸方向の広がりや幅を考慮し、三次元空間で定義される。

式(1)の感度分布関数 $h_i(\mathbf{r})$ を用いると、 $i$ 番目のディテクターにより得られる投影データは、次式で与えられる。

$$g_i = \int_{\nu} h_i(\mathbf{r}) f(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (i=1 \sim M) \quad (2)$$

次に、式(1)で示した感度分布関数の内積を要素にもつマトリクス $HH^+$ を作成する。以下、本論文ではこのマトリクスをGARDSマトリクスと呼ぶ。

$$[HH^+]_{ij} = \int_{\nu} h_i(\mathbf{r}) h_j(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (3)$$

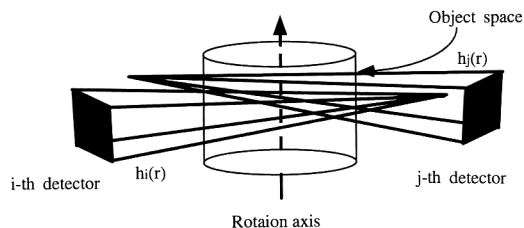


Fig. 3. Continuous-discrete model of X-ray CT.

再構成に用いるフィルターはGARDSマトリクスの逆行列を求めることにより与えられる。得られたフィルターを投影データに作用させると式(4)のようになる。

$$\mathbf{g}' = (HH^+)^{-1} \mathbf{g} \quad (4)$$

ここでベクトル $\mathbf{g}'$ は、フィルタリングされた投影データである。GARDSマトリクスは、三次元の感度分布関数を用いて作成されているため、ここで用いられるフィルターはFBP法の場合とは異なり、X線ビームの回転軸方向の広がりや幅を考慮して作成されたものとなる。

推定像は、フィルタリングされた投影データ $\mathbf{g}'$ を感度分布関数に従って逆投影することによって得られる。

$$\tilde{f}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^M g'_k \cdot h_k(\mathbf{r}) \quad (5)$$

式(5)からわかるように、GARDSによる推定像は感度分布関数の線形結合により表現される。すでに述べたように、感度分布関数は四角錐状の形状をしているので、推定像にこの感度分布関数の形状が表れることにより構造物を判別しにくくなってしまふ恐れがある。そこで、ここでは可視化のためのサンプリング関数としてrect関数を選ぶことにより感度分布関数もっている高周波成分を抑制する。

$$\tilde{f}(\mathbf{r}_i) = \sum_{k=1}^M g'_k \cdot \int_{\nu} \text{rect}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) h_k(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (6)$$

これは、連続系で得られた推定像をrect関数でコンボリューションし、デルタ関数でサンプリングしたのと同じことを意味している。

ここで、本手法の特徴をまとめると以下のようになる。

- (1) 現実の投影系を正確にモデル化している。
- (2) X線ビームの三次元的広がりや幅を考慮したフィルターを設計できる。
- (3) 投影系のもつ伝達特性を最大限に生かした再構成を行うことができる。

このように、従来法では考慮することのできなかったX線ビームの回転軸方向の広がり等を、本手法ではデ

テクターの感度分布関数として表すため、再生像におけるモデル化の誤差をを最小限に抑えることができる。さらに従来法に比べ再生像の回転軸方向の分解能を向上させることが可能となると考えられる。

### 3. 数値シミュレーション

本手法の有効性を確認するために、計算機によるシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた投影系の条件を Fig. 4 に示す。シミュレーションで用いた計算機ファントムは、FBP 法による再構成において端部効果が再生像に生じる場合を想定して作成した。Fig. 5 に三次元の原物体の二次元断面を 2 種類のウィンドウ幅で示したものの、および端部効果を生じさせるために追加した構造物の位置を示す。

以上の投影系において観測された投影データより FBP 法および本手法を用いて再構成を行った。再構成結果のミッドプレーンにおける二次元断面を、Fig. 6 に Fig. 5 と同様に 2 種類のウィンドウ幅で示す。これらの結果を比較すると、FBP 法による再生像には端部効果によるアーチファクトを生じているが、本手法による再生像ではこれが低減されていることが確認できる。さらに回転軸方向の分解能を示すために、式 (7) により定義される resolving kernel<sup>4)</sup> を評価式として導入する。Resolving kernel  $R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})$  は、点  $\mathbf{r}_i$  での再生像  $\hat{f}(\mathbf{r}_i)$  に対する原物体  $f(\mathbf{r})$  からの寄与を示す式であり、その半値幅が小さいほど分解能が高いとされる。

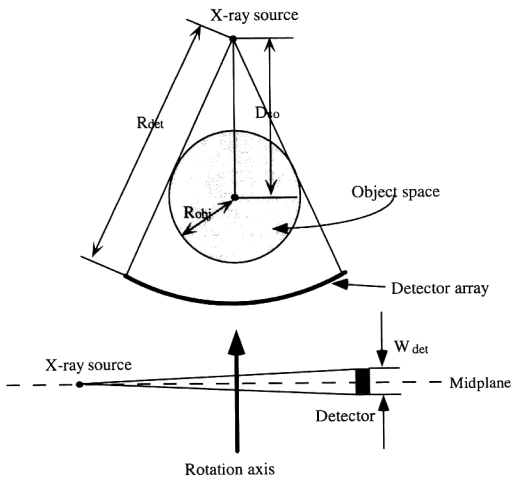
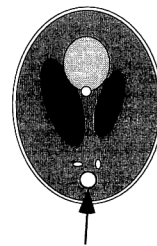
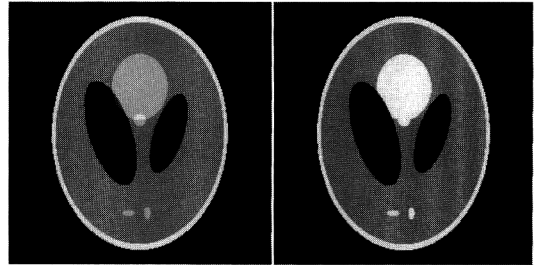


Fig. 4. Geometry of the computer simulation. Number of detectors: 128, number of projections: 300, radius of object space:  $R_{obj}$  25 cm, source-rotation axis:  $D_{so}$  60 cm, source-detector:  $R_{det}$  100 cm, aperture of detector:  $W_{det}$  1 cm.

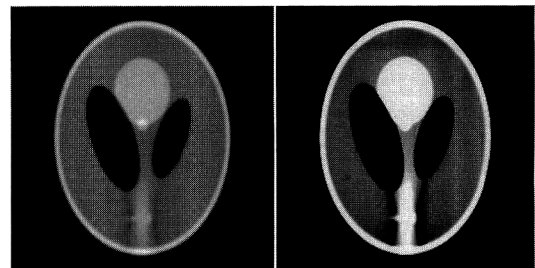
$$\hat{f}(\mathbf{r}_i) = \int_V R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) f(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (7)$$

端部効果の生じている点での回転軸方向の Resolving kernel を示したグラフが Fig. 7 である。Resolving ker-

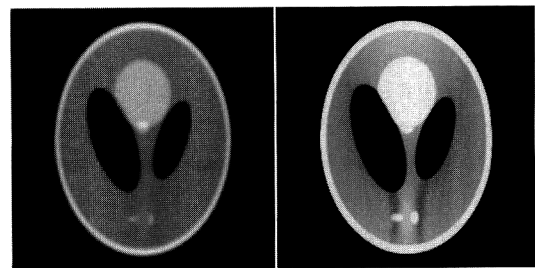


An object which causes the edge effect

Fig. 5. Cross-section image of the ideal object.



(a)



(b)

Fig. 6. Reconstructed images. (a) obtained by the FBP reconstruction, (b) obtained by the GARDS reconstruction.

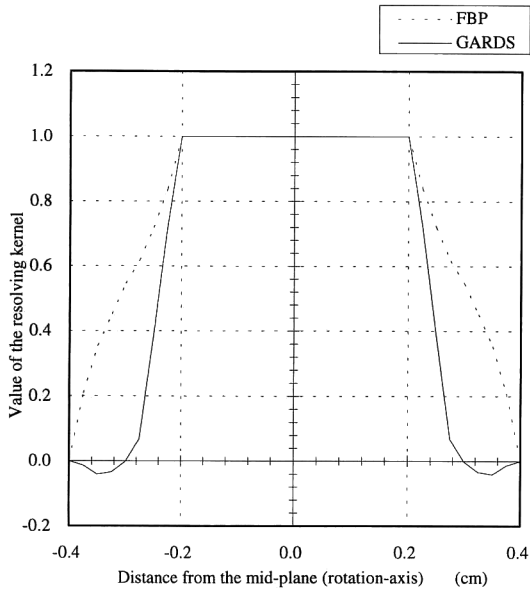


Fig. 7. Comparison of the resolving kernel.

nelのFWHM(半値幅)はGARDSが0.483 cm, FBPが0.624 cmとなっており, この結果からも回転軸方向の分解能が向上していることが確認できる。この比較により, シングルスキャン方式のX線CTの再構成手法として本手法が従来法に比べ有効であることが示された。

さらに, X線ビームの三次元的広がりを考慮したフィルターを設計することの効果を示すために, X線ビームの広がりを考慮せずに感度分布関数を二次元で定義し, GARDSにより再構成を行った結果をFig. 8に示す。再生像はFig. 6(a)のFBP法による結果に非常によく似たものであり, 端部効果によるアーチファクトを強く生じている。このことから, 端部効果によりアーチファクトが生じる原因は, 再構成時にX線ビームが回転軸方向に広がりをもつことを考慮しないためと考えられる。GARDSによる再構成においても, 感度分布関数を二次元で定義した場合と三次元で定義した場合では, 生成されるGARDSマトリクスが異なるため, その逆行列であるフィルターも異なったものとなる。この結果からも, 現実の投影系を正しくモデル化し, フィルターを作成することは良好な推定像を得るための重要な要素であるといえる。

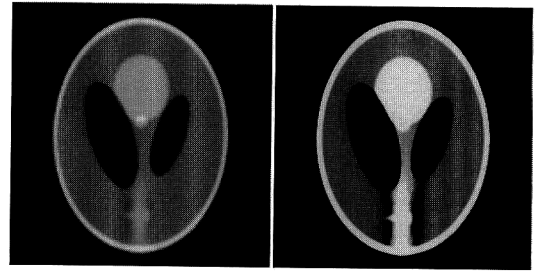


Fig. 8. Reconstructed images obtained by the 2-dimensional GARDS reconstruction.

#### 4. ま と め

X線CT画像の再構成において, 物体空間, 観測空間をそれぞれ連続, 離散系で取り扱う連続-離散モデルを用いた投影系のモデル化を行った。さらにGARDSを適用することで, 現実の投影系に則したフィルターを設計し, 再構成を行う手法を提案した。また, 本再構成手法を適用することで, 端部効果によるアーチファクトを抑制できることを, シミュレーションにより示した。以上の結果より, 本手法は三次元CT画像再構成における回転軸方向の分解能向上に有効であると考えられる。

本論文で提案した手法は, FBP法と比較して, 再構成フィルター作成に逆行列計算を必要とするため, その計算に多大な時間を要することになる。このため, ヘリカルスキャンCT等, さらに大規模な逆行列を必要とするX線CT装置への適用には計算量の削減が今後の課題となる。しかしながらこの問題を解決すれば, 前もって, 撮影を行うX線撮像機器に適合したフィルターの作成を行っておくことで, FBP法と同程度の時間で良好な再生像を得ることが可能であるため, あらゆるX線CT装置の再構成手法として広く用いることが可能になると期待できる。

#### 文 献

- 1) 東木祐介, 利府俊裕, 荒舘 博, 平尾芳樹, 大山永昭: “ヘリカルスキャンにおける補間再構成法の検討”, *Med. Imaging Technol.*, **8** (1990) 253-254.
- 2) 東木祐介: “ヘリカルCTのハードウェア”, *Med. Imaging Technol.*, **11** (1993) 593-599.
- 3) N. Ohyama and H. H. Barrett: “A proposal of GARDS,” *Signal Recovery Synth. IV Tech. Dig.*, **11** (1992) 105-107.
- 4) W. Menke: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory* (Academic Press, San Diego, 1989) pp. 171-182.