

> 研究速報 <

二次元領域設定型 CT 装置の開発 — アクティブコリメータを搭載した 実験装置の製作と基礎的評価 —

橋本二三生*¹ 寺本 篤司*¹ 浅田 恭生*¹ 鈴木 昇一*¹ 藤田 広志*²

要 旨

近年、CTの被曝低減技術のひとつとして領域設定型CTがある。本技術は、投影データ収集時にX線照射範囲を制限することによって関心領域のみの断層像を取得するものであり、原理的に関心領域外部の被曝を低減することが可能である。現在、本手法に関して画像再構成手法の検討等が行われているが、シミュレーションなど擬似的な環境での検証しか行われていない。そこで、本研究ではより実践的な検討を行うために実験装置を開発し、その基礎的な評価を行った。実験装置は小型のCTスキャナに2軸のアクティブコリメータを追加し、投影角ごとに照射野形状を変化させることで関心領域に限定した投影データを収集する。収集した投影データに対し補正処理を施し、FBP法を用いて画像再構成することで断層像を取得する。検証の結果、領域設定を行っても通常スキャンと同等の画質が得られ、被曝線量は通常スキャンに比べ大幅に低減することが明らかとなった。

キーワード：X線CT、被曝、画像再構成、不完全投影データ、アクティブコリメータ

Med Imag Tech 34(2): 123-127, 2016

1. はじめに

近年、コンピュータ断層撮影 (computed tomography: 以下CT) 装置の多列化、検査適応の増加のためCT検査による成人患者の被曝線量は増加傾向にあり、被曝低減技術の開発が急務となっている[1]。現在のX線CT装置は、検査の対象部位である関心領域の断層像を取得する場合においても、有効視野すべての範囲で照射が行われている。そのため、検査対象領域外の不必要な被曝が生じている。もし、関心領域に限定してX線を照射し、トランケーションされた不完全な投影データから断層像取得が可能ならば、領域外の被曝線量を大幅に低減することができる。このような機構をもったCTを本研究では領域設定型CTとよぶ。

先行研究としてNooら[2]は、トランケーションされた投影データに対し、ヒルベルト変換を用いた画像再構成法を提案している。また、Kudoら[3]は、断層像上に設定した関心領域内の小さな領域で既知となる先見情報があれば、インテリア問題を解決できることを示した。Gongら[4]は、これらの手法を具現化した小動物用実験装置を開発している。この装置は、固定サイズのコリメータを使用してCT撮影を行うことで、コリメータの開口サイズに対応した円形領域の断層像を取得することができる。それぞれ、シミュレーションや実験装置での検討が行われているが、任意の関心領域形状を設定できる実験装置の開発は行われていない。

そこで、本研究では、被曝の低減が期待できる領域設定型CT技術を開発することを目的としている。本論文では、その基礎的検討として、任意の二次元関心領域を設定できる実験装置を製作し、取得した断層像の基礎的な評価ならびに被曝線量の評価を行った結果を報告する。

*¹ 藤田保健衛生大学大学院保健学研究科 [〒470-1192

豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98]

e-mail: teramoto@fujita-hu.ac.jp

*² 岐阜大学大学院医学系研究科

投稿受付：2015年5月19日

採録決定日：2016年1月28日

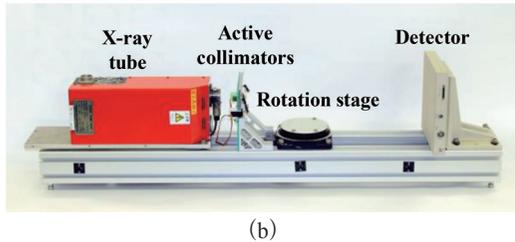
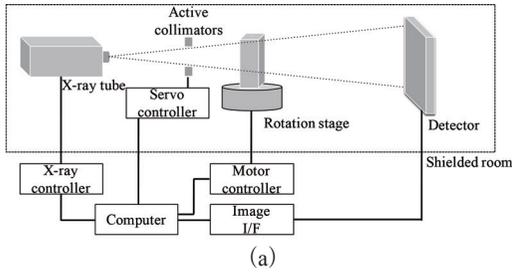


図1 二次元領域設定型 CT 装置. (a) 接続図, (b) 外観図.

2. 手 法

1) 二次元領域設定型 CT 装置

二次元領域設定型 CT を用いて断層像の取得が可能であるか検証を行うため, 本研究では実験用装置の開発を行った. ここでは, 開発した装置の概要と画像再構成処理について述べる.

2) 二次元領域設定型 CT 装置の概要

図1に二次元領域設定型 CT 装置の接続図および外観図を示す. X線管や検出器, X線の遮蔽を行うアクティブコリメータなどのスキャン部, それらを制御する制御部で構成されており, 防護室外にあるコンピュータから遠隔操作にて撮影を行う.

制御部は, コンピュータにステージ制御ユニット, X線制御ユニットおよび画像取込ユニットを接続し, コンピュータからの指示に基づき, X線の制御やモータの制御および投影データの転送などを行う.

使用した X線管と検出器の詳細を表1および表2に示す.

本装置では, 被写体の周りをスキャン部が回転するのではなく, 中央の回転ステージに置かれた被写体を回転させることで全方位からの投影データを収集する.

なお, 本装置の線源-検出器間距離は 510 mm, 線源-被写体間距離は 200 mm となっている.

表1 X線管詳細.

型番	L7901, 浜松ホトニクス
最大管電圧	100 kV
最大管電流	0.1 mA
焦点サイズ	5 μm
ターゲット	W
窓材	Be
付加フィルタ	0.5 mm, Al

表2 検出器詳細.

型番	C7942CA, 浜松ホトニクス
方式	間接変換型 FPD
シンチレータ	CsI (Tl)
画素ピッチ	50 μm
マトリクス数	2366 \times 2368
フレームレート	2 frame/s
濃度分解能	12 bit

3) アクティブコリメータ

本装置は, アクティブコリメータを用いて関心領域外の X線を遮蔽し, 関心領域のみの投影データを収集している. 図2にアクティブコリメータの概要図および外観図を示す. アクティブコリメータは, 線源から 100 mm の位置に設置されており, 動作スピード 217°/s のサーボモータ (EMAX 社製, ES3103) からの回転運動をクランク機構により直線運動に変換し, 遮蔽板を動作させている. このときの遮蔽板の最大動作スピードは 73.8 mm/s である.

遮蔽板は, 図3に示すように, 1 mm 厚の鉛板とアルミ板で構成されており, 遮蔽板の端面構造は板と垂直になっている. また, 遮蔽板の制御は, 投影角度ごとに X線管焦点と断層面上の関心領域輪郭を結ぶ線まで遮蔽板を動作させている.

なお, 本コリメータの繰り返し位置決め誤差は 0.1 mm 以下である.

4) 投影データ補正処理

本手法で収集した投影データから直接断層像を取得すると, 画像再構成問題[2, 3]によりトランケーションアーチファクトが生じる. この問題を低減するために本手法では, 以下のステップに沿って補正処理を行う.

[ステップ1] 収集投影データ $p(u, \theta)$ の X線が関心領域を通過した領域 R における平均画素

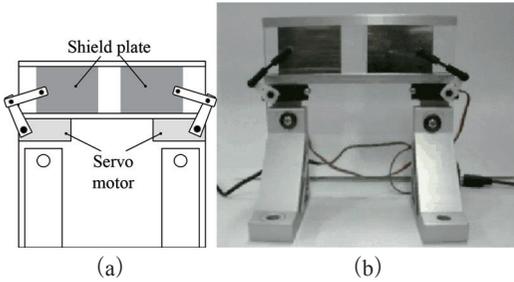


図2 アクティブコリメータ. (a) 概要図, (b) 外観図.

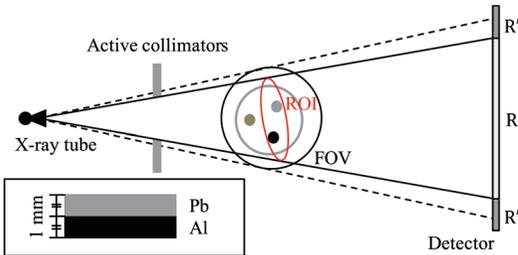


図3 遮蔽板の制御と構造 (関心領域: ROI).

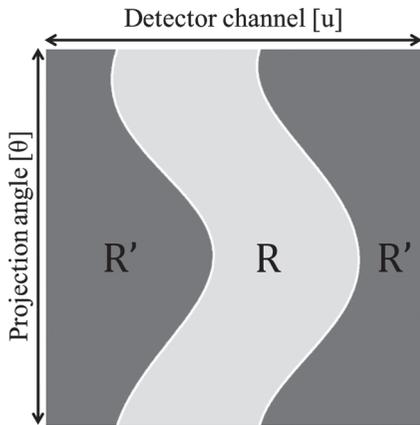


図4 投影データ $p(u, \theta)$.

値 m を求める。ここで、 u, θ は図4に示すように、それぞれ検出器のチャンネル番号、投影角度を表す。

[ステップ2] $p(u, \theta)$ のX線が遮蔽されている領域 R' に対し、平均画素値 m を代入する。ここで、領域 R' は、図3に示すように、X線管焦点と断層面上の関心領域輪郭を結ぶ線が検出器に交わる座標より外側の領域を指す。

本処理を適用することで、領域 R の境界での信号値差が小さくなり、一般的な画像再構成処

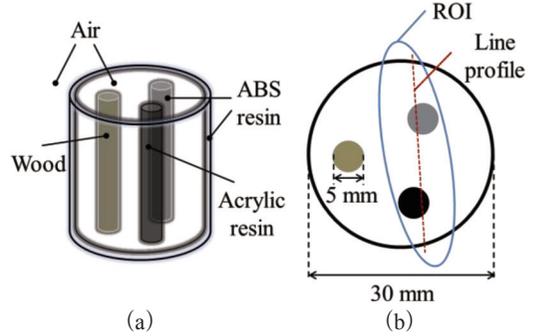


図5 画質評価用ファントム. (a) ファントム外観, (b) ファントム断面.

理においても、トランケーションアーチファクトを低減することが可能となる。

5) 画像再構成処理

画像再構成処理としてさまざまな手法が検討されているが、本研究では医用CT装置で多く用いられている、filtered back projection法 (以下FBP法) に基づいた画像再構成を行う [5]。再構成演算プログラムの開発には Visual C++ 2012 ならびに Intel C++ コンパイラを使用し、4つの演算コアを有するコンピュータ (Intel Core i5-3470 3.20 GHz) にて並列処理が行われるように再構成アルゴリズムを最適化した。

3. 性能評価

本装置を用いてファントムの断層像を取得した。また、本装置の被曝低減効果を確認するため、アクリル円柱ファントムによる線量評価を行った。

1) ファントムによる画質評価

開発した実験装置を用いて断層像が取得可能であるか検証するため、ファントム撮影を行った。まず、図5に示す円柱型のファントムを作成した。このファントムを回転ステージに設置し、完全な投影データ収集を行う従来型のスキャン方法と、アクティブコリメータを使用して不完全な投影データ収集を行う提案手法によりCT撮影を行った。このとき設定した関心領域を図5(b)に示す。そして、得られた断層像からラインプロファイル解析を行い、画質特性を評価した。撮影の際に使用した諸条件を表3に示す。

2) 被曝線量の評価

本装置の被曝低減効果を確認するため、被曝

表3 ファントム撮影条件.

管電圧	80 kV
管電流	0.1 mA
加算フレーム数	2
投影データ数	360
有効視野	40 mm
再構成マトリクス数	2048 × 2048

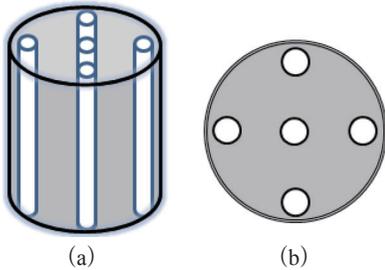


図6 線量評価ファントム. (a) ファントム外観, (b) ファントム断面.

表4 被曝線量評価条件.

管電圧	80 kV
管電流	0.1 mA
撮影時間	180 s
有効視野	40 mm
関心領域	16 mm

線量の測定を行った. ファントムには, 図6に示す直径40 mm, 高さ50 mmの円柱型アクリルに直径4.5 mmの貫通穴を5か所設けたファントムを用いた. 従来型CTと, 領域設定型CTにて撮影を行い, 線量を比較した. 線量は, 中心1点, 周辺4点の計5点を3回測定し, 3回測定の平均値を使用した. なお, 線量計には熱ルミネセンス線量計(極光社製, MSO-S)を用いた. 評価の際に使用した諸条件を表4に示す.

4. 結果

1) ファントムによる画質評価

ファントムによる画質評価の結果を図7に示す. 同図(a)は, 本装置にて収集したサイノグラムである. 同図(b)は, 従来型CTで撮影した断層像である. また, 同図(c)は, 領域設定型CTで撮影し, 投影データ補正処理を行った場合の断層像, 同図(d)は, 補正処理を行わなかった場合の断層像である. 同図それぞれの画像にて,

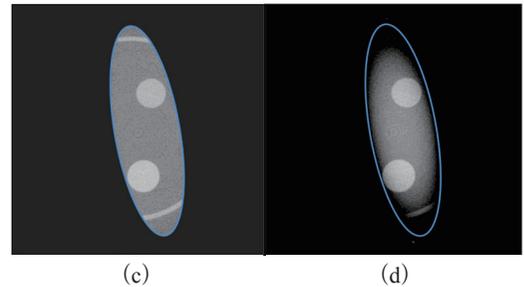
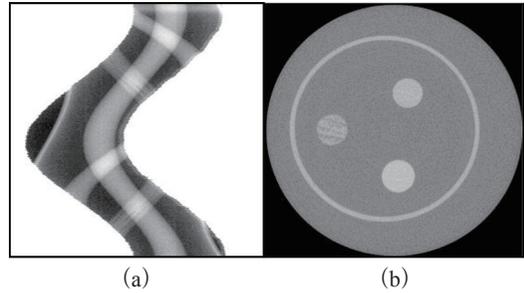


図7 ファントムによる画質評価結果(青色:ROI). (a) サイノグラム, (b) 従来型CT, (c) 領域設定型CT・補正あり, (d) 領域設定型CT・補正なし.

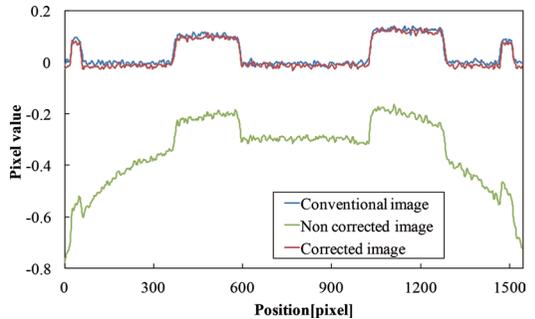


図8 ラインプロファイル.

図5(b)に示した中波線部から得られたラインプロファイルを図8に示す.

2) 被曝線量の評価

アクリル円柱ファントムを用いて測定した結果, 中心線量は従来型CTで74 mGy, 領域設定型CTで76 mGyとなった. 周辺線量は従来型CTで92 mGy, 領域設定型CTで27 mGyとなった.

5. 考察

ファントムによる画質評価において, 画像再構成前に簡易的な補正処理を行うことで, 関心領域周辺部のアーチファクトを大幅に低減させ

つつ、楕円形の断層像を取得できた。また、ラインプロファイル解析結果より、形状の再現性は良好であったが、画素値の低下がみられた。この原因として、トランケーションされた投影データに対し、簡易的な補正処理法を用いた画像再構成を行っていることから、断層像の解が一意に定まらなかったことが考えられる。また、補正をしていない断層像の画素値が負の値になった原因として、アクティブコリメータによりX線が遮蔽され、関心領域外の投影データが高吸収になったことが挙げられる。

被曝線量評価において、本装置にて断層像を取得した場合、周辺線量が大幅に低下することが確認された。これは、本装置が既存の臨床機で課題となっていた、同一断層像上を反復撮影するCT透視検査やダイナミック造影検査などの、被曝線量増加の問題を解決できることを示唆している。

なお、本装置における関心領域の設定方法については、医用X線CT装置で撮影されているような2方向の位置決め画像を用いることで、大まかな設定が可能であると考えられる。

6. まとめ

本論文では、二次元領域設定型CT装置を開発し、基礎的な画質と被曝線量について評価した。今後は、本装置にて得られた断層像の定量解析を行い、本装置の有用性を確認する必要がある。また、さまざまな関心領域形状や複雑な構造のファントムを用いて撮影を行い、領域の形状と画質の関係を詳細に検討する予定である。

文 献

- [1] 浅田恭生, 鈴木昇一, 小林謙一, 他: X線診断時に患者が受ける線量の調査研究(2011)による線量評価. 日本放射線技術学会誌 **69**: 371-379, 2013
- [2] Noo F, Clackdoyle R, Pack JD: A two-step Hilbert transform method for 2D image reconstruction. *Phys Med Biol* **49**: 3903-3923, 2004
- [3] Kudo H, Courdurier M, Noo F, et al.: Tiny a priori knowledge solves the interior problem in computed tomography. *Phys Med Biol* **53**: 2207-2231, 2008
- [4] Gong H, Lu J, Zhou O, et al.: Implementation of interior micro-CT on a carbon nanotube dynamic micro-CT scanner for lower radiation dose. *Proc SPIE* **9412**: 94124N-1-94124N-9, 2015
- [5] 石田隆行, 桂川茂彦, 藤田広志: 再構成アルゴリズム. 田口克行編: 医用画像ハンドブック. オーム社, 東京, 2000, pp651-663

Development of the Two-dimensional Region-setting CT System: Development and Basic Evaluation of the Experimental System Using the Active Collimators

Fumio HASHIMOTO ^{*1}, Atsushi TERAMOTO ^{*1}, Yasuki ASADA ^{*1},
Shoichi SUZUKI ^{*1}, Hiroshi FUJITA ^{*2}

^{*1} Graduate School of Fujita Health University

^{*2} Graduate School of Gifu University

Recently, region-setting CT has been studied as an ROI imaging method. This technique can strongly reduce the radiation dose by limiting the irradiation field. For this reason, mathematical studies to reduce the truncation artifact have been conducted. However, no experimental studies have so far been performed. In this study, we developed a two-dimensional region-setting CT system and performed basic evaluations, such as those of its imaging properties. As an experimental system, we developed a micro-CT system with two-channel active collimators. In this way, truncated projection data only including selected region can be captured. Empty regions of the collimated projection data were corrected. Finally, the slice image was obtained by image reconstruction using the filtered back projection algorithm. In the experiments, the shape reproducibility and image quality of the reconstruction image were evaluated and were found to be similar to those of conventional scan images. In addition, radiation dose of the proposed method was reduced strongly. These results indicate that this system may be useful for the dose reduction of X-ray CT systems.

Key words: X-ray CT, Radiation exposure, Image reconstruction, Truncated projection, Active collimator

Med Imag Tech **34**(2): 123-127, 2016