

■原著

ライン型レーザー光を用いたヘリカル CT 装置の 教育用模擬システムの構築

Construction of educational simulated system of helical scan CT equipment using line LASER

小倉 泉¹, 山口 達也², 乳井 嘉之¹
安部 真治¹, 根岸 徹³, 篠田 之孝⁴

Izumi Ogura¹, Tatsuya Yamaguchi², Yoshiyuki Nyui¹
Shinji Abe¹, Toru Negishi³, Yukitaka Shinoda⁴

要 旨：現在、X線 CT 装置は人体の内部組織を可視化する装置として、臨床現場において日常的に用いられている。そのため、診療放射線技師を養成する教育現場では主に実機を用いた実習・教育が行われている。しかし、学生が X 線 CT 装置の構成や画像再構成の原理を理解することは容易ではない。また、教育現場では X 線 CT 装置の構成システムと画像処理システムを組み合わせた簡便な教育用実験装置はほとんど見受けられない。そのため、筆者らは X 線 CT 装置を模擬する新たな教育用装置システムの開発を企図し、学生実験に導入できる模擬実験システムの構築を行った。本システムは X 線ファンビームをライン型のレーザー光で模擬し、コンベンショナルスキャンとシングルスライスのヘリカルスキャンによる画像再構成が行え、ヘリカルピッチによるアーチファクトの影響等の実験ができ、X 線 CT 装置の動作原理の理解を深める一助として、高い教育効果が期待できる。
キーワード：模擬 CT 装置、教育用実験システム、ヘリカル CT 装置、教育支援システム

I はじめに

現在、非侵襲で人体の内部組織を可視化できる X 線 CT (Computed Tomography) 装置は臨床現場において、日常的に用いられている状況である。臨床現場で X 線 CT 装置を操作する診療放射線技師を養成する教育施設では主に実際の X 線 CT 装置を用いた実験・実習を行っている。しかし、実際の X 線 CT 装置では大型かつ内部構造が複雑で

あるため実験・実習内容が制限される。また、X 線による被曝の危険性にも配慮する必要がある。さらに X 線 CT 装置は再構成画像のみが結果として得られるため、学生が X 線 CT 装置に実装されている電氣的・画像解析的な原理を理解することは難しい課題となっている。そのため、教育現場では学生が X 線 CT 装置を理解するために、簡便な構造かつ操作が容易である X 線 CT 装置を模擬

1 首都大学東京 Tokyo Metropolitan University

2 日本大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Technology, Nihon University

3 群馬県立県民健康科学大学 Gunma Prefectural College of Health Sciences

4 日本大学 Nihon University

した教育用実験装置が望まれている。

本研究の目的はX線被曝の危険性がない、光を用いた教育用模擬CT装置システムを開発し、教育現場の学生実験にシステムを導入することである¹⁻³⁾。既に、X線を用いた教育用コンビームCTシステム⁴⁾が報告されているが、X線を用いているため、被曝の危険性を有し、教育用実験装置の動作を近傍で観察することができない欠点がある。一方、近年、コンピュータの高速化に伴い、数値ファントムを用いたコンピュータシミュレーションも演習で取り入れることも可能になっている⁵⁾。しかし、光を用いてX線CT装置を模擬した教育用実験装置の特徴はX線被曝の危険性がなく、実際に取得したデータを用いて画像再構成することにより、模擬CT画像が取得できる点が大きな利点である。さらに、光を用いることにより視覚的にわかりやすく、実験装置の動作を目視できる利点もある。また、模擬実験装置のシステムにも数値ファントムを用いたシミュレーションを組み込むことも可能である³⁾。

筆者らはX線CT装置と同様の画像再構成アルゴリズムによるレーザー光を用いた教育用模擬CT装置システムの構築について検討を行ってきた¹⁻³⁾。既報では第1世代であるペンシルビームCT装置を模擬するため、光ヘテロダイン干渉法を用いた模擬システムを構築している。しかし、X線CT装置は第3世代のファンビームを用いたヘリカルCT装置、さらにコンビームを用いた

マルチスライスCT装置へ発展している^{6,7)}。そのため、筆者らは第3世代のX線CT装置を模擬する新たな教育用装置システムの開発を企図し、学生実験に導入できる模擬実験システムの構築を行った^{8,9)}。本模擬システムはX線ファンビームをライン型のレーザー光で、寝台移動を直動ステージで模擬することにより、コンベンショナルスキャンとシングルスライスのヘリカルスキャンによる画像再構成が行え、ヘリカルピッチによる再構成画像のアーチファクトの影響が実験できる。本模擬システムはCT装置の基本的な構成・原理の理解を助ける教育支援システムとして、高い教育効果が期待できる。さらに、光を用いているため、X線被曝の問題がなく、X線の取扱いの有資格者がいない状況でも実験が可能であり、CT装置への理解に対する学生の自主性を高める効果が期待できる。

II システムの構築

1. 光学システムの構成

図1は実験装置の構成である。実験装置はレーザー、測定試料(ファントム)、フォトダイオードアレイ、回転ステージ及び直動ステージから構成されている。光源のレーザーはファンビームを模擬するため、ライン型の赤色半導体レーザー(キコー技研, MLXL-D13-640-10, 波長640nm, 出力6.4mW)を用いた。レーザーは学生実験への導入も考慮し、可視域の赤色光とした。レーザーの

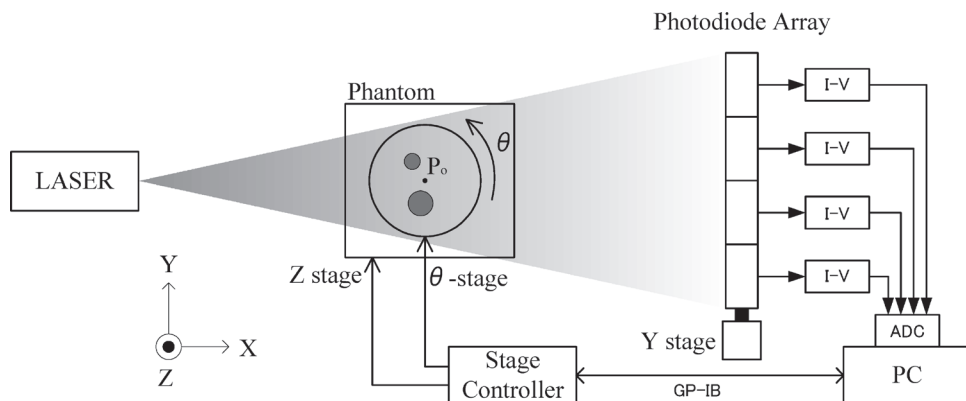


図1 実験装置の構成

出力光の分布は内蔵した非球面ガラスレンズにより、扇状に広がり、その断面がライン型になっている。光出力のパワーは内蔵した Auto Power Control (APC) 回路により、一定に制御している。光源からの光は Si 系の 16 素子フォトダイオードアレイ (浜松ホトニクス, S11299-021) を用いて検出する。フォトダイオードアレイは素子サイズが $1.175 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 、素子間ピッチが 1.575 mm であり、幅が 25.4 mm である。検出器であるフォトダイオードアレイは複数配列することにより長尺化が行え、4 個配列することにより、幅 101.6 mm の 64 素子のフォトダイオードとした。フォトダイオードアレイの検出信号は 1 個のフォトダイオードアレイ (16 素子) あたり 1 枚の回路基板に電流 - 電圧変換回路 (I-V 回路) を 16 個配置し、フォトダイオードアレイ数の拡張が容易に行えるようにした。検出器の出力は 64 チャンネルの A-D 変換器 (コンテック, AD16-64 (LPCI) LA, 16 bit) を用いてコンピュータ (PC) に取り込んだ。ファントムの走査は 2 軸ステージコントローラ (シグマ光機, SHOT-302GS) を用い、ファントムの長さ方向である Z 軸方向に走査する直動ステージ (シグマ光機, SGSP26-100) と θ 方向に回転する回転ステージ (シグマ光機, SGSP-40YAW) を用いてスキャンを行える。レーザー光は回転ステージの回転中心 P_0 を通った光が検出器の中心位置に入射するように、Y 方向の手動ステージ (位置分解能 0.1 mm) を用いて検出器の位置を調整する。

スキャン方式は光源と検出器を被写体に対して輪切り状にスキャンするコンベンショナルスキャンと、らせん状に走査するヘリカルスキャンの 2 種類について比較することができる。

測定は第 3 世代の Rotate-Rotate 方式を模擬したデータを取得するため、回転方向 (θ 方向) に回転ステージにより走査間隔 $\Delta\theta$ で等間隔に行う。回転ステージは Z 軸方向にも走査できるように直動ステージに取り付けてある。回転ステージが 1 回転したときの Z 方向の変化量 ΔZ_T とファンビームを模擬したレーザーのビーム厚 D の比がヘリカルピッチ (hp) となる^{6,7)}。実験に用いたライン型のレーザーのビーム厚 D は 1 mm であり、

直動ステージの移動分解能を $1 \mu\text{m}$ に設定している。そのため、本実験装置では回転ステージの 1 回転に対し直動ステージを $\Delta Z_T = 360 \mu\text{m}$ 移動させることにより、ヘリカルピッチを $hp = 0.36$ まで設定することができる。

本光学システムはフォトダイオードアレイの配列数を増やすことにより、検出器の幅を増加させることができ、より大きなファントムの測定も行える拡張性を有している。

2. 操作システムの構成

実験装置の操作システムは診療放射線技師を養成する教育施設での学生が実習することを考慮し、グラフィカルなインターフェースである Lab VIEW (National Instruments) を用いて構築した。コンピュータに精通していない学生でも容易に実験に取り組める環境とした。

ファントムを走査する回転ステージの走査間隔 $\Delta\theta$ 、回転速度 V_θ などの設定は Lab VIEW 上で任意に設定が行える。本模擬システムの画像再構成法は取得した投影データをファンパラ変換後、 180° のフィルタ補正逆投影法 (Filtered Back Projection, FBP) を用いた¹⁰⁾。なお、再構成フィルタは Shepp-Logan, Ram-Lak, Hamming フィルタなどを選択することができる。本実験では Shepp-Logan フィルタを用いて画像再構成を行った。ヘリカルスキャンは Z 軸方向にらせん状に走査するため、ある位置 Z_i において画像再構成を行うには位置 Z_i の前後で取得したデータを用いてヘリカル補間する必要がある^{6,7)}。本模擬システムではヘリカル補間に 360° 補間を用い、位置 Z_i の前後各々 1 回転の計 2 回転分の取得データにおいて、位置 Z_i からの距離による重み付け加算したヘリカル補間を行った後、本システムの画像再構成法により再構成画像を算出している。

操作システムの画面は図 2 のようになっている。図中の左側はコントロールパネルになっており、コンベンショナルスキャンとヘリカルスキャンの選択が行える。ヘリカルスキャンでは hp を任意に設定することができる。図中の右上は実験中のファントムのサイノグラム取得状況をモニタリングしており、右下はデータの取得終了後にコントロールパネルで選択していた再構成フィル

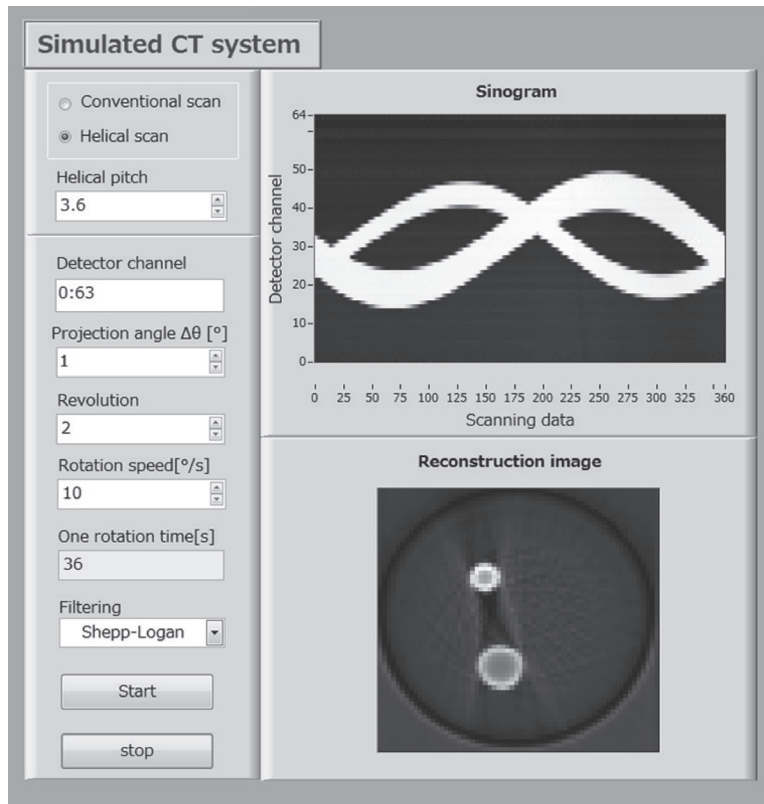


図2 模擬システムの画面

タによる再構成画像を表示する。

III 実験方法

実験に用いたファントムは2本の円筒棒(ファントムA)と球状試料(ファントムB)である。本模擬システムにおいて、ファントムは光を遮光する役割をしている。図3はファントムA、Bの横方向からの概略図である。図3(a)は直径が各々5mm、8mmの太さが異なる黒色プラスチック製の2本の円筒棒で構成したファントムAである。2本の円筒棒の配置は回転中心から10mmの位置に取り付け、2本の円筒棒と回転中心 P_0 のなす角を 120° に設定した。一方、図3(b)は直径35mmの球状の黒色プラスチック製の試料を回転中心 P_0 の位置に取り付けたファントムBである。

まず、ファントムの投影データを取得する前に、フォトダイオードアレイの位置による出力補正

(キャリブレーション)を行うため、ファントムがない状態でライン型のレーザー光を入射したときのフォトダイオードアレイの検出信号を取り込む。取得したフォトダイオードアレイの各出力は出力の最大値で規格化し、フォトダイオードアレイの位置による補正係数を作成する。キャリブレーションはファントムの投影データをこの補正係数で除算して行った。実験はキャリブレーションした投影データを用いて、画像再構成を行った。

1. コンベンショナルスキャンの実験

実験はファンビームを模擬したライン型レーザーと直線状のフォトダイオードアレイを用いたコンベンショナルスキャンによる投影データの取得を行った。投影データの取得は回転ステージを 1° 毎走査して静止させたステップスキャン、並びに、データ取得の高速化をはかるため、回転ステージを回転させながら 1° 毎に360投影の取得を行った。測定はファントムAを設置し、操作

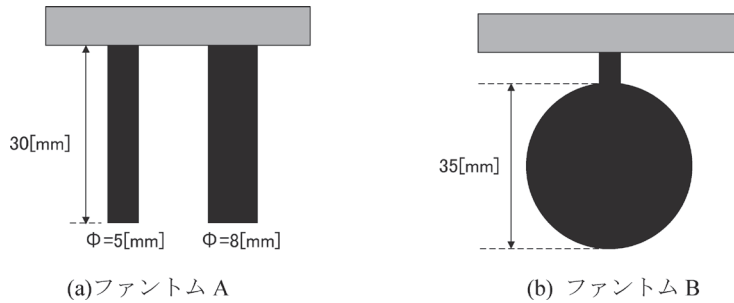


図3 ファントムの概略図

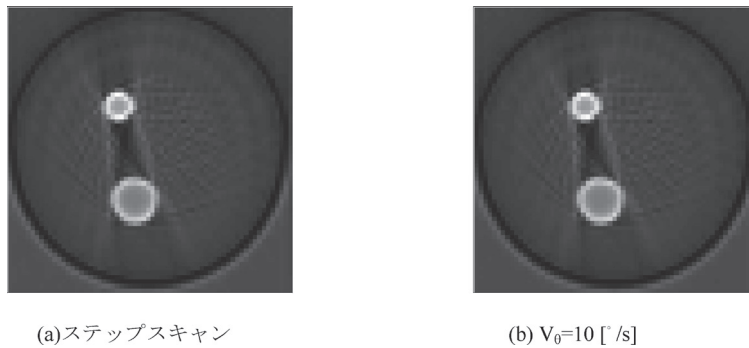


図4 コンベンショナルスキャンによる再構成画像

システムのコンベンショナルスキャンを選択し、投影データの取得を行い、操作システム上で画像の再構成を行った。

2. ヘリカルスキャンの実験

ヘリカルスキャンの実験は本模擬システムにおいて回転ステージとZ軸直動ステージを同時に走査することで行う。測定はファントムAを設置し、操作システムのヘリカルスキャンを選択し、ヘリカルピッチ hp を設定した後、投影データの取得を行い、操作システム上で画像の再構成を行った。投影データは回転ステージを回転させながら 1° 毎取得した。画像再構成は 360° 補間を用いて操作システム上で行った。

3. ヘリカルピッチの実験

ヘリカルスキャンの投影データを取得する際、Z軸方向のヘリカルピッチによる再構成画像への影響を調べるために、ファントムBを用いて実験を行った。実験は球状試料のファントムBの中心部と下部の2箇所での測定を行った。測定はコンベンショナルスキャンとヘリカルスキャンのヘ

リカルピッチ hp を変化させて行った。

IV 実験結果

1. コンベンショナルスキャンの結果

図4は2本の円筒棒で構成したファントムAを回転ステージに取り付けたときの再構成画像の結果である。図4(a)は回転ステージを 1° 毎走査して静止させたときのステップスキャンの結果であり、2本の円筒棒の断層像が得られている。図4(b)はデータ取得の高速化をはかるため、回転ステージの回転速度 V_θ を $10^\circ/\text{s}$ で連続走査したときの再構成画像の結果である。ここで、A-D変換器の1チャンネルあたりのA-D変換時間は最大 $10\ \mu\text{s}$ になっている。回転ステージの最大回転速度 V_θ が $10^\circ/\text{s}$ のとき、64チャンネルの変換時間の間に回転ステージは最大 0.0064° 回転することになるが、再構成画像に与える影響は十分小さいと考えられる。データ取得の高速化をはかった実験で得られた図4(b)は図4(a)と同様の再構成画像が得られており、回転ステージを回転させながら

データ取得を行っても影響がないことが確認できた。そこで、以降の実験では回転速度 V_{θ} を $10^{\circ}/s$ で行った。

2. ヘリカルスキャンの結果

図5はファントムAのヘリカルスキャンにより得られた断層像であり、ヘリカルピッチ hp は 0.72 とした。図5は図4の再構成画像とほぼ同等となっていることがわかり、本模擬システムがヘリカルスキャンによる断層像を取得できることを示している。

図6はヘリカルスキャンの特徴である高速スキャンを目的に hp を 3.6 とし、回転の走査間隔 1° 、Z軸の走査幅 3.6 mm (走査速度 0.1 mm/s)、走査間隔 0.01 mm で行ったときの結果である。図6はファントムAの断層像の3次元表示であり、本模擬システムにより、任意の面での再構成が行え、Z軸方向の矢状面の断層像も取得するこ

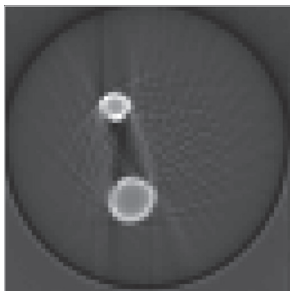


図5 ヘリカルスキャンによる再構成画像 ($V_{\theta} = 10^{\circ}/s$)

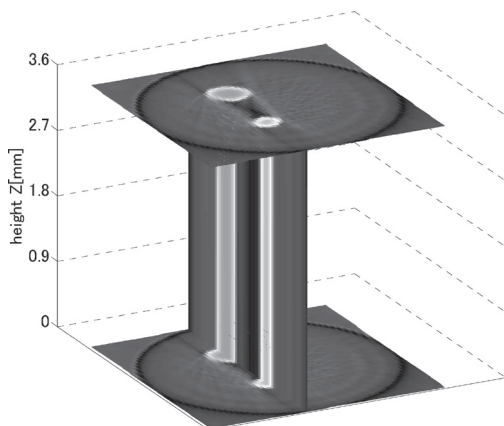


図6 高さ (Z軸) 方向に走査した再構成画像

とができることがわかる。

3. ヘリカルピッチの結果

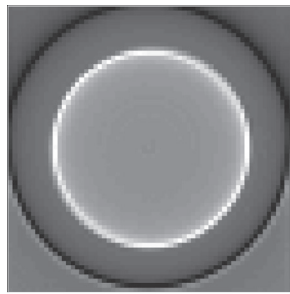
図7はファントムBの球状試料の中心部の測定を行った再構成画像の結果である。図7(a)はコンベンショナルスキャンであり、図7(b), (c), (d)はヘリカルスキャンの hp が各々 $0.72, 1.8, 3.6$ である。球状試料の中心部はZ軸方向の走査において、球状試料の断面の変化が小さいため、コンベンショナルスキャンの再構成画像に比べ、ヘリカルスキャンの hp による影響が小さいことがわかる。

図8はファントムBの球状試料の下部の測定を行った再構成画像の結果である。球状試料の下部はZ軸方向の走査において、球状試料の断面の変化が大きくなる。図8(a)はコンベンショナルスキャンであり、図8(b), (c), (d)は hp が各々 $0.72, 1.8, 3.6$ である。ヘリカルピッチ hp が 0.72 のとき、コンベンショナルスキャンとほぼ同様の再構成画像が得られている。しかし、ヘリカルピッチ hp が $1.8, 3.6$ では球状試料の断面の変化が大きくなるため、再構成画像に風車状アーチファクトが生じ、 hp の値が大きくなるほど、風車状アーチファクトの影響が大きくなっていくことがわかる。一般に、シングルスライス用のヘリカルCT装置では hp を 2 以上で用いるべきではないと言われている⁷⁾。このように、本模擬システムを用いることで、コンベンショナルスキャン並びにヘリカルスキャンによる再構成画像の比較が行え、ヘリカルピッチと再構成画像の風車状アーチファクトとの関係を検討することができる。

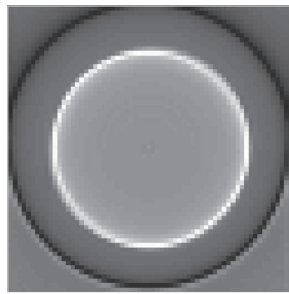
V 検討

本模擬システムを学生実験に導入することを考慮し、投影データによる再構成画像並びに実験装置の設置における検討を行った。

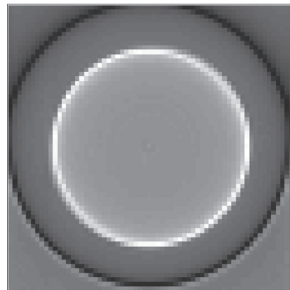
まず、本模擬システムは光を用いているため、ファントムで光を遮光することになる。そこで、ファントムでの遮光による再構成画像への影響について、シミュレーションを行った。シミュレーションにおけるファントムは実験に用いたファントムAを想定し、コンピュータ上で数値ファントムを作成した。図9(a)は数値ファントムの再



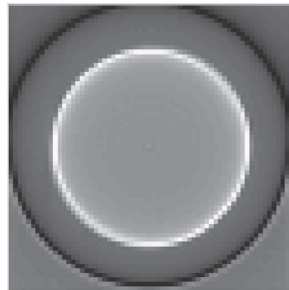
(a) コンベンショナルスキャン



(b) $hp=0.72$

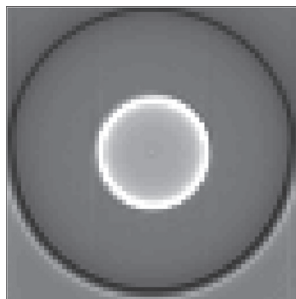


(c) $hp=1.8$

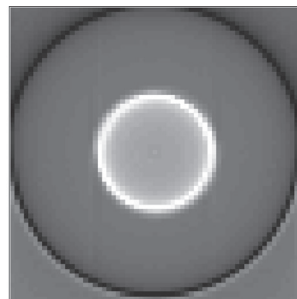


(d) $hp=3.6$

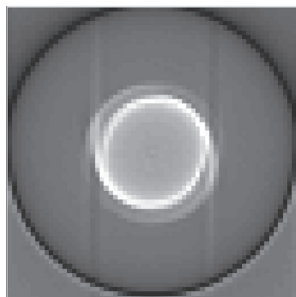
図 7 球状試料の中心部の再構成画像



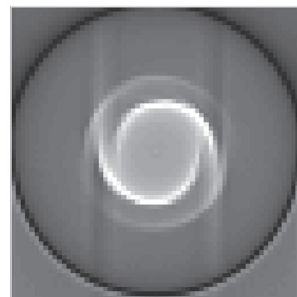
(a) コンベンショナルスキャン



(b) $hp=0.72$



(c) $hp=1.8$



(d) $hp=3.6$

図 8 球状試料の下部の再構成画像

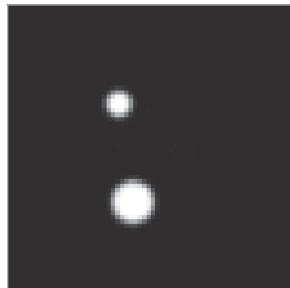
構成画像の結果である。図9(b)は数値ファントムの投影データであるサイノグラムにおいて、遮光を模擬するため、2値化を行った後に、画像再構成を行った結果である。2値化はサイノグラムの最大値の10%以上の値を1に、10%未満の値は0にする処理を行った。図9(b)は2値化処理をしているため、図9(a)の再構成画像に対し、ファントムの周辺部の濃度が高くなっていることがわかる。これは本模擬システムで得られた再構成画像の実験結果と同様の影響を示している。このことから、本模擬システムでは投影データが検出器に光が入射するか遮光されるかのデータのようにになっていることがわかり、画像再構成したファントムの周辺部の濃度が高くなるのがわかる。この点が実際のX線CT装置で得られる再構成画像との大きな違いである。

次に、本模擬システムの実験装置の設置において、回転ステージの回転中心 P_0 を通った光が検出器の中心位置からずれた場合について検討を

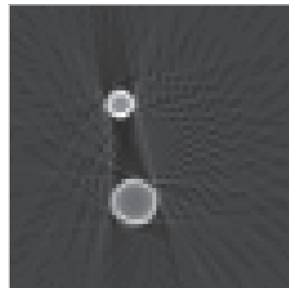
行った。図8のコンベンショナルスキャンの実験において、検出器の設置位置をY方向に手動ステージを用いて、 $\pm 2\text{mm}$ 移動させて実験を行った。図10(a), (b)は検出器の設置位置を各々 $\Delta Y = 2\text{mm}$, $\Delta Y = -2\text{mm}$ 移動させたときの再構成画像である。位置ずれのないコンベンショナルスキャンで取得した再構成画像である図7(a)に比較し、球状試料の再構成画像が円形にならず、アーチファクトが生じていることがわかる。このことから、本模擬システムの実験装置の設置において、検出器のY方向の調整が重要であるとともに、検出器がずれた場合の実験が行えることを示している。

VI 結論

診療放射線技師を養成する教育現場において、ヘリカルCT装置の模擬実験システムを構築し、学生実験への導入を目的に、レーザー光を用いた教育用模擬CT装置システムを構築した。

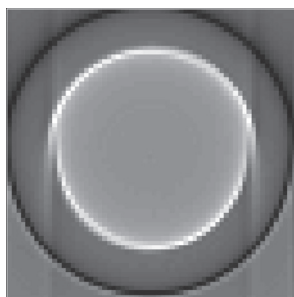


(a)再構成画像

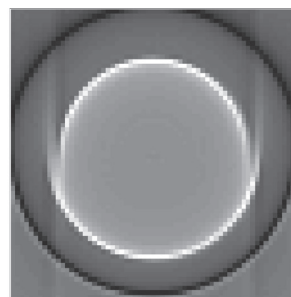


(b)2値化後の再構成画像

図9 数値ファントムの結果



(a) $\Delta Y=2[\text{mm}]$



(b) $\Delta Y=-2[\text{mm}]$

図10 検出器の位置ずれの影響の結果

- (1)本模擬システムはX線ファンビームを模擬したライン型のレーザー光と1次元フォトダイオードアレイを用いて構築しており、さらに、寝台移動を模擬した直動ステージを組み合わせることによりヘリカルスキャンを行うことができる。本模擬システムは光を用いているため、X線被曝の問題がなく、学生実験等において、X線の取扱いの有資格者がいない状況でも実験が可能であり、学生の自主性を高めることが期待できる。
- (2)本模擬システムを用いることでコンベンショナルスキャンとヘリカルスキャンを模擬した再構成画像が得られることを示した。ヘリカルスキャンにおいて、360°補間を用いた再構成画像が取得でき、ファントムの矢状面の断層像が得られることを示した。また、本模擬システムを用いることでヘリカルピッチが再構成画像に与えるアーチファクトの影響の実験を行えることを示した。
- (3)本模擬システムを学生実験に導入することを考慮し、投影データの再構成画像並びに実験装置の設置における検討を行った。本模擬システムでは投影データが検出器に光が入射するか遮光されるかのデータになっており、画像再構成したファントムの周辺部に影響が現れることを示した。実験装置の回転台の回転中心と検出器の中心が位置ずれを生じている場合、球状試料の再構成画像が円形にならず、アーチファクトが生じることを示した。

今後、診療放射線技師を養成する教育現場の学生実験に本模擬システムを導入していく予定である。

謝辞：本研究の回路製作にご協力いただきました日本大学理工学部平成25年度卒業生の菊池飛鳥君に心より感謝致します。また、本研究は科学研究費補助金(No.24501197)の助成を受けた。

文 献

- 1) 小倉泉, 乳井嘉之, 安部真治, 他: レーザー光を用いた教育用模擬X線CT装置の基礎的検討. 日本保健科学学会誌, 10(1): 43-50, 2007.
- 2) 小倉泉, 乳井嘉之, 安部真治, 他: 光ヘテロダイン干渉法を用いた教育用模擬CT装置システムの構築. 日本保健科学学会誌, 11(2): 80-86, 2008.
- 3) 小倉泉, 乳井嘉之, 安部真治, 他: コヒーレント光を用いたCT装置を模擬した教育用実験システム. 電気学会論文誌A, 131(8): 608-614, 2011.
- 4) 寺本篤司, 尾崎香帆, 宮下真梨子, 他: 放射線技師教育用コーンビームCTシステムの開発. 日本放射線技術学会雑誌, 67(9): 1200-1208, 2011.
- 5) 篠原広行, 中世古和真, 陳欣胤, 他: コーンビームCT画像再構成の基礎. 医療科学社, 東京, 2013.
- 6) 森一生, 山形仁, 町田好男: CTとMRI —その原理と装置技術—. コロナ社, 東京, 2010.
- 7) 山下康行: わかるヘリカルCT—撮像・読影の基本からマルチスライスCTまで. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2000.
- 8) 小倉泉, 乳井嘉之, 安部真治, 他: ヘリカルCT装置のレーザー光による教育用模擬装置の構築の検討. 平成25年電気学会全国大会, 1-016, 2013.
- 9) 山口達也, 小倉泉, 乳井嘉之, 他: レーザー光によるヘリカルCT装置の教育用模擬実験システムの構築. 平成26年電気学会全国大会, 1-010, 2014.
- 10) 橋本雄幸, 篠原広行: C言語による画像再構成の基礎. 医療科学社, 東京, 2006.

Abstract : X-ray computed tomography (CT) equipment is currently used in everyday clinical sites to visualize internal tissues of the human body. The education and practical training in educational institutions that train medical radiological technicians normally employ actual equipment. However, it is not necessarily easy for students to understand the configuration of X-ray CT equipment and the principle behind image reconstruction. The easy-to-use experimental equipment for educational purposes that combine fundamental configuration of CT equipment and image-processing system are hardly found at training sites.

Against this background, we planned the development of a new educational system that could simulate X-ray CT equipment. Therefore we constructed a working simulation system that could be used in student experiments. This system is able to simulate an X-ray fan beam with line-shaped laser light, and reconstruct images based on a conventional scan or helical scan. Also this system has the ability to perform experiments on the effects of helical pitch or on the generation of artifacts. We expect this system to have a high educational effect as an aid in deepening a student's understanding of the operation principles of CT equipment.

Key words : simulated CT system, educational experiment system, helical scan CT equipment, educational support system

(2014年7月11日 原稿受付)