

機関番号：22604
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20500838
 研究課題名（和文） コヒーレント光を用いた可搬型教育用模擬 CT 装置システムの開発と
 学生実験への導入
 研究課題名（英文） Development of portable and educational simulated CT device
 for introduction into student experiment using coherent light
 研究代表者
 小倉 泉（Ogura Izumi）
 首都大学東京・人間健康科学研究科・教授
 研究者番号：50204160

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、診療放射線技師を養成する教育施設の学生のため X 線 CT を模擬した簡便な教育用実験装置システムの構築である。本研究はレーザー光を用いた X 線 CT 装置を模擬した教育用実験システムを提案し、画像再構成の模擬実験において数値ファントム実験並びに本実験システムで得られたデータを用いた画像再構成実験できるシステムを構築し、学生実験への導入のための実験システムを開発した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to build a simple educational test system that simulates the functions of an X-ray CT device for students that aim the radiographers. This research achieved the construction of an educational test system that simulates an X-ray CT device using laser light for simulation experiments, and the construction of a system that is capable of performing image reconstruction experiments using data obtained with this test system for educational experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学 教育工学

キーワード：教育機器、模擬 CT 装置、模擬 CT 画像、教育支援システム

1. 研究開始当初の背景

現在、臨床現場では生体内部の可視化診断装置として、診断用 X 線撮影装置とともに X 線 CT 装置が用いられている。特に、X 線 CT 装置は身体の断層画像を容易に得られるため、医療現場ではひとつの施設に複数台を設置する場合も多く、これらの装置を早朝から夕方までフル稼働で利用しているのが現状である。そのため、教育の現場においても主

にこれら装置を用いた実験・実習を行っているが、学生総数と実験・実習項目数の都合上、1 班の学生数が 10 名程度となるため、学生に装置の構成と画像再構成の原理を理解させるのは容易ではない。また、実際の装置はシステム自体が大型で複雑なため、実験実習内容に制限を受けることも多い。

以上の理由から、教育現場では電氣的システムならびに画像処理システムの原理を理

解させるための簡便な教育用実験装置が求められているが、全くない状況にある。

2. 研究の目的

本研究の目的は高価で原理の修得が難しい X 線 CT 装置システムを模擬した光による可搬型模擬 CT 装置システムを開発すること、診療放射線技師養成施設の教育現場へ導入すること、安全性の配慮から光を用いたために放射線被曝の問題がないこと、可視光の光を用いることで学生が実際に目で確認できること、ファントムや実験条件等を任意に設定可能であることなどの点が挙げられる。

光を用いた教育用模擬 CT 装置を開発することにより、光吸収分布画像が得られ、臨床現場で広く用いられている X 線 CT 装置を模擬することが可能となるとともに、安価で運搬及び収納が可能な模擬装置を開発することにより、複数台の実験装置による少人数での実験・実習が行えるため、より高い教育効果が期待できる。

模擬 CT 装置の場合、測定試料（ファントム）を簡便に作成できる利点があり、ファントムを高さ方向に掃引することによりスライス画像が得られ、ファントムの高さ方向の縦断像も模擬することができ、より高度な教育への寄与が得られる。

3. 研究の方法

ペンシルビーム X 線の代わりにレーザー光を用いた Translate-Rotate 方式による模擬 CT 装置を構築した。まず、低学年用の実験システムとして、直接検出法による模擬 CT 装置を構築した。また、数値ファントムを用いた数値実験並びに模擬 CT 装置の実験の再構成画像の表示を行うための画像再構成システムを構築した。次に、高学年用実験システムとして、より高度な光ヘテロダイン検出法による模擬 CT 装置を構築した。

(1) 直接検出法による模擬 CT 装置（低学年用実験システム）の構築

直接検出法による模擬 X 線 CT 装置の概観を図 1 に示す。原理を初歩から学ぶため第 1

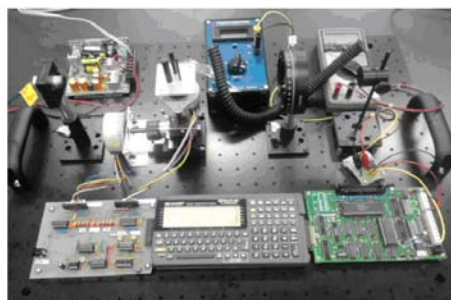


図 1 直接検出法による模擬 X 線 CT 装置

世代の Translate-Rotate 方式を採用した。これは X 線を細いペンシルビーム状に狭めたもので受光部を 1 つ持つ X 線 CT 装置の基本的構成となる。

本システムでは光学系の小型化のために、光源には半導体レーザーを用い、光パワーメーターで検出した。教育用模擬 CT 装置においては、ビームの視認性が重要となるため、赤色領域の波長を用いた。ファントムは直動ステージと回転ステージで構成した走査ステージ上に固定し、Translate-Rotate 方式のデータを取得した。ステージにはステップモーターを用いた。直動ステージは 1 mm ステップとし、移動幅は 30 mm とした。回転ステージは回転角 $\Delta\theta$ を 15° ステップで走査を行い、 180° 回転させた。本模擬 CT 装置の制御にはポケットコンピュータ（シャープ：PC-G850S）を用い、C 言語にて制御プログラムを作成した。透過光強度データについては光パワーメーターのアナログ出力を増幅し、A-D 変換ボードを用いてポケットコンピュータのメモリに記録した後、RS232C を経由してハイパーターミナルによりパーソナルコンピュータへ転送した。模擬 CT 装置全体を 60cm × 45cm の取手付ブレッドボード上に固定してあるため、可搬することができる。

画像再構成は Image J を用いて、各角度に分割された画像を開き、角度情報ごとに画像を回転させておく。得られた画像を積み重ね処理（stack）を行うことにより、画像をまとめておく。その後、単純逆投影像を作成することにより断層画像を作成する。

(2) 画像再構成システムの構築

数値ファントムを用いた数値実験並びに模擬 CT 装置の実験の再構成画像の表示を行うための画像再構成システムを構築した。数値実験は任意の形状のファントムの画像を読み込み、ファントムを投影したデータであるサイノグラム及びフィルタ補正逆投影法（filtered backprojection、以下、FBP 法と記す）を用いた画像再構成を行うことができる。数値実験では学生が任意で作成した画像をファントムとして実験が行える。また、FBP 法による画像再構成では Shepp-Logan フィルタなどの周波数フィルタを 5 種類組み込んでおり、周波数フィルタによる再構成画像の比較も行える。模擬 CT 装置で取得したデータを用いた画像再構成では数値実験と同様に FBP 法による 2 次元の断面像の表示及び複数枚の断面像を用いた 3 次元表示を行うことができる機能も組み込んだ。

(3) 光ヘテロダイン検出法による模擬 CT 装置（高学年用実験システム）の構築

光ヘテロダイン検出法による模擬 CT 装置は散乱媒質を有するファントムの計測を考

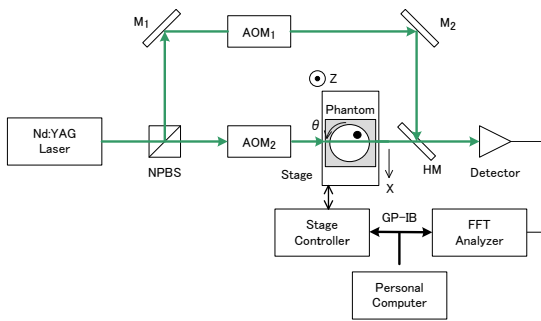


図 2 光ヘテロダイン検出法による模擬CT装置の構成

慮した実験システムである。レーザー光が散乱体に入射すると、わずかな直進光である前方多重散乱直進光成分（以下、直進光成分と記す）と散乱光成分に分かれる。X線CT装置と同様の投影定理に基づくアルゴリズムを適用するため、直進光成分のみを検出する必要がある。光ヘテロダイン検出法は微弱な直進光成分のみを検出することができる特徴を有している。そこで、本システムはわずかに周波数が異なる2つのコヒーレントな光による光ヘテロダイン検出法を用いて構築した。

図2はコヒーレント光を用いた実験装置である。光源はNd:YAGレーザーの第2高調波（波長532nm、ビーム径0.7mm）を用いた。光学系は光源、マッハツェンダー干渉計および2台の音響光変調器（Acousto-optic Modulator、以下、AOMと記す）から構成されている。2台のAOMはレーザー光を各々周波数シフトし、その変調周波数の差が10kHzである。光源から出射された光は無偏光ビームスプリッターNPBSで参照光と測定光に2分される。参照光はAOM1（変調周波数80MHz）を通り、ミラーM2、ハーフミラーHMで反射される。測定光はAOM2（変調周波数80.01MHz）、測定試料（ファントム）を通り、参照光と重ね合わせて検出器に入射する。測定光の光路にはステージに取り付けられたファントムを設置する。

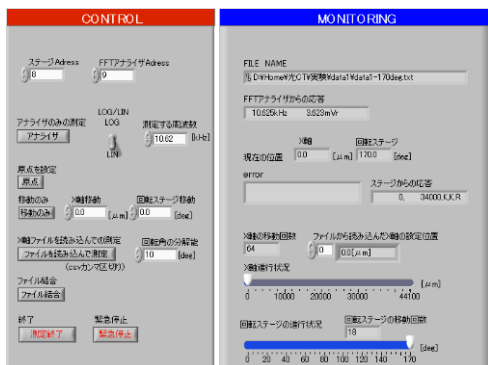


図3 測定システムのモニタ画面

測定系は2台のAOMの周波数差である10kHzのビート周波数を検出するFFTアナライザ、ステージを制御するステージコントローラ及びコンピュータから構成されている。

実験はTranslate-Rotate方式を実現するため、直動ステージによりX軸方向に0.7mm間隔で64回の走査を行い、投影データを取得する。次に、回転ステージにより回転方向 θ に走査間隔 $\Delta\theta$ の回転を行い、直動ステージを走査して投影データを取得し、これを繰り返すことでサイノグラムが得られる。また、回転ステージにはZ軸方向の走査ができるようにステージを取り付けた。ファントムは石英ガラスの立方体容器（底面50mm角）に回転ステージを取り付けた黒色のプラスチック製の円筒棒を挿入し、散乱性のある白色懸濁液を水で希釈し石英ガラス容器に注入して構成した。

実験装置の操作システムは教育施設での学生が実験・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LabVIEWを用いて構築した。図3は構築した自動計測システムのモニタ画面である。図中の左側では自動計測する各種の制御パラメータの設定を行い、図中の右側は実験の進捗状況を実タイムで表示を行う。

4. 研究成果

(1) 直接検出法による低学年用の模擬CT装置システムの結果

本模擬CT装置を用いて実験を行い、ファントムの画像再構成を行った。図4(a)は実験に用いたファントムであり、直径が各々3mm、5mm、8mmの3本の黒い円筒棒である。図4(b)は再構成画像の結果である。12方向の画像を積み重ね処理を行い、単純逆投影法することにより、3本の円筒棒の断面が取得できることがわかる。

また、学生実験・実習の課題として、図5に示すように投影画像データを少なくすることで、X線CT画像への影響を考察することができる。図(a)は投影画像を $15^\circ \sim 90^\circ$ までの6画像を単純逆投影した再構成画像であ

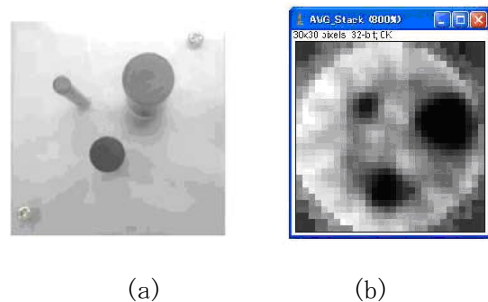


図4 ファントムの写真と単純逆投影による再構成画像

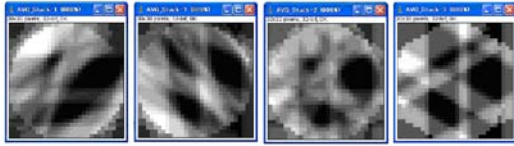


図 5 投影画像数を変化させたときの単純逆投影画像

り、図(b)は投影画像を $105^\circ \sim 180^\circ$ までの 6 画像を単純逆投影した再構成画像である。また、図(c)は投影画像間隔を $30^\circ \sim 180^\circ$ まで 30° 間隔で 6 画像を単純逆投影した再構成画像であり、図(d)は投影画像間隔を $60^\circ \sim 180^\circ$ まで 60° 間隔で 6 画像を単純逆投影した再構成画像である。

(2) 学生実験導入のためのテキスト及び補助教材の作成

学生実験に導入するための実験テキストの作成を行い、図 6 にその一部を示す。実験タイトルは「レーザー光を用いた模擬 CT 装置による画像再構成の実験」とした。

また、学生が自主的に画像再構成の操作を行うことができるように、「画像再構成用マニュアル」も作成した。学生実験において、学生が主体的に実験に取り組めるように、解りやすく視覚的な操作マニュアルとした。Image J を用いて画像再構成を行う際に、各角度に分割された画像を開き、角度情報ごとに画像を回転させておき、得られた画像を積み重ね処理 (stack) を行う手順を分かりやすく、かつ視覚的にするため、図を中心とした補助教材である。

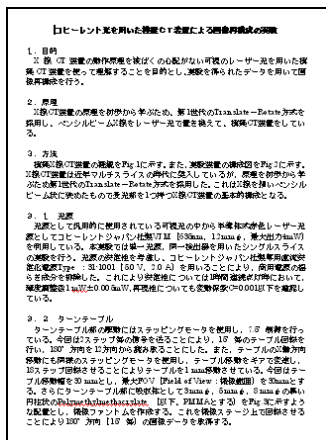


図 6 実験テキスト

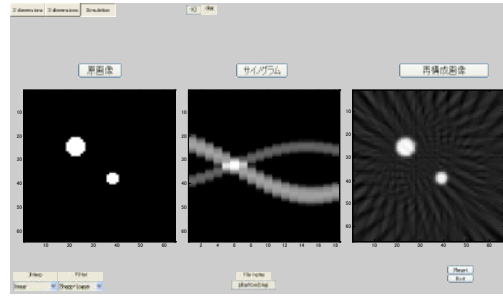


図 7 画像再構成システムを用いた数値ファントム実験の結果

(3) 画像再構成システムを用いた数値ファントム実験の結果

図 7 は画像再構成システムを用いた数値ファントムによる数値実験の結果である。図中の左側の原画像はファイルから読み込んだ画像 (数値ファントム) であり、画像サイズが 64 画素 \times 64 画素で大きさの異なる 2 つの円状の吸収物体を模擬している。図中の中央の画像はサイノグラムであり、数値ファントムの回転方向の走査間隔 $\Delta \theta = 10$ 度で投影した結果である。横軸は検出器の回転方向の角度の分割数であり、縦軸は検出器の並びの方向である。なお、回転方向の走査間隔の設定は図中の中央上部に数値を入力することで設定ができる。図中の右側の画像はサイノグラムを FBP 法により画像再構成した結果である。再構成画像は多少ぼやけた画像になっているが、原画像を復元できている。また、走査角度が 10° であることから、周囲にアーチファクト (偽像) が生じていることがわかる。本画像再構成システムを用いた数値ファントム実験の特徴は学生が作成した任意の数値ファントムの画像を用いた画像再構成の実験が行える。また、画像再構成における FBP 法の周波数フィルタを図中の左下で 5 種類選択することができる。さらに、各画像のタイトル箇所をクリックすることにより、別ウィンドウで画像を表示させることができ、画像の保存並びに印刷等を個別に行うことができる機能も有しており、学生実験のレポート作成に有益である。これらの機能は模擬 CT 装置で得られたデータを用いた 2 次元表示並びに 3 次元表示においても同様に行える。

(4) 光ヘテロダイン検出法による高学年用の模擬 CT 装置システムの結果

光ヘテロダイン検出法による模擬 CT 装置を用いて、ファントムの直径 8mm と 5mm の円筒棒が接触した実験を行った。回転ステージの走査間隔 $\Delta \theta$ は 10° 、溶液濃度 ϵ は 1% とした。図 8(a) は再構成画像である。実験ではファントムの円筒棒が光を遮断するため、2

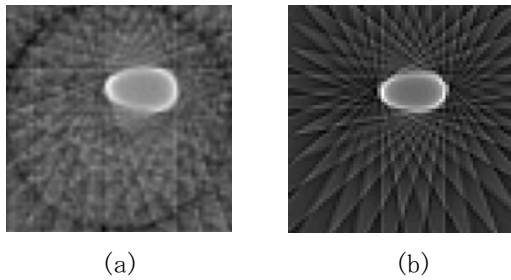


図 8 模擬 CT 装置の再構成画像と数値ファントムを用いた再構成画像の比較

つの円筒棒の接線と円筒棒の間の情報が取得できていないため、再構成画像はこの領域を可視化できていないことがわかる。図 8(b)は図 8(a)の実験を模擬するため、2つの円状物体を接触させた数値ファントムによる再構成画像の結果である。模擬 CT 装置において光が円筒棒に遮断されることを考慮して画像再構成を行った。模擬 CT 装置で得られた再構成画像と数値ファントム実験で得られた再構成画像は同様に2つの円筒棒の接線と円筒棒の間がぼやけて可視化できておらず、ほぼ同様の再構成画像が得られていることがわかる。

次に、ファントムの直径 8mm の円筒棒に直径 3mm、5mm の円筒棒を部分的に取り付け、ファントムの高さ方向に複数枚の断層像を取得し、3次元表示することを行った。実験は高さ Z の走査間隔 ΔZ を 0.7mm、回転ステージの走査間隔 $\Delta \theta$ を 10° 、溶液濃度 ε を 1%とし、 Z 方向に 26 断面の測定を行った。

図 9 は画像再構成システムによる 3次元表示の結果である。図中の左側の画像は測定した 26 断面の断層像を用いて作成した縦断像である。図中の右側の画像は測定した 26 断面の断層像のマルチフレーム表示である。本画像再構成システムを用いた模擬 CT 画像実験の特徴は図中の右下のボタンを押すことにより、 X 軸、 Y 軸、 Z 軸の方向、回転方向並びに任意方向の断面の連続スキャン表示が行え、スキャンスピードも設定することがで

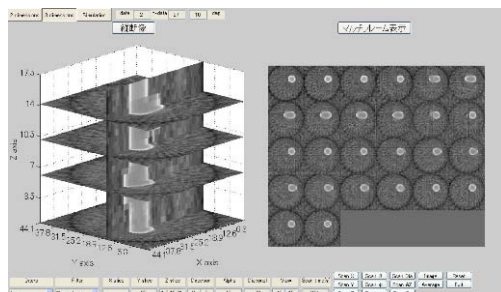


図 9 画像再構成システムを用いた 3次元模擬 CT 画像の結果

きる。さらに表示の視点方向や任意のスライス面(オブリーク断面)を設定することができる。数値ファントム実験と同様に、画像再構成における FBP 法の周波数フィルタを様々選択することができる。本実験システムが X 線 CT 装置の 3次元表示を模擬できていることがわかる。

(5) 結言と展望

コヒーレント光を用いた学生実験用の教育用模擬 CT 装置システムの開発を行った。模擬 CT 装置はペンシルビーム X 線をレーザー光に置き換え、Translate-Rotate 方式による模擬 CT 装置を構築した。成果をまとめると以下ようになる。

①直接検出法による模擬 CT 装置(低学年用実験システム)

1) レーザー光を用いた可搬型教育用模擬 CT 装置を開発し、単純投影法による画像再構成が行えるシステムを開発した。

2) 学生実験に導入するためのテキストの作成並びに学生が自主的に画像再構成の操作を行うことができるように、補助教材である「画像再構成用マニュアル」の作成を行った。

②光ヘテロダイン検出法による高学年用の模擬 CT 装置システム

1) ファントムを散乱性のある媒質にした場合の散乱光の影響を避けるため直進光成分のみを検出できる光ヘテロダイン検出法による模擬 CT 装置を開発した。

2) 本システムはファントムの形状等を任意に選択でき、さらに数値ファントム実験と模擬 CT 装置実験の比較が行える等の利点があり、高い教育効果を挙げるシステムになりうることを示した。

3) 本システムは複数の断層像を用いて縦断像を作成することができ、任意の方向での表示、任意方向の断面並びに断面の連続スキャン表示が行える機能を有している。本実験システムが実際の X 線 CT 像のように 3次元データの取扱いを模擬できることを示した。

以上のことから、構築した模擬 CT 装置システムを教育現場の学生実験に導入することにより、少人数での実験・演習が行えることになる。この模擬 CT 装置システムが全国の診療放射線技師養成施設において導入されることになれば、その教育効果及び成果は計り知れないものになる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

① 小倉泉、乳井嘉之、安部真治、根岸徹、篠田之孝、伊達紀彦、圓谷光徳、肥後尚志、

- 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、査読有、Vol. 131、No. 8、2011、(掲載決定)
- ②根岸徹、白石明久、長島宏幸、小倉泉、安部真治、加藤洋、可視光を利用した模擬X線CT装置の開発、群馬県立県民健康科学大学紀要、査読有、Vol. 6、2011、pp21-31
- ③小倉泉、乳井嘉之、安部真治、根岸徹、篠田之孝、圓谷光徳、肥後尚志、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、査読有、Vol. 11、No. 2、2008、pp80-86

[学会発表] (計6件)

- ①小倉泉、乳井嘉之、安部真治、根岸徹、篠田之孝、肥後尚志、コヒーレント光を用いたX線CT装置を模擬した教育用実験システムの構築、電気学会・光応用・視覚研究会 & 計測合同研究会、LAV-11-004 & IM-11-004、平成23年2月24日、休暇村指宿
- ②Izumi Ogura、Yukitaka Shinoda、Norihiro Date、Takashi Higo、Fundamental Experiment of Simulated CT System using Optical Heterodyne Interferometry、Proceedings of the International Symposium on Integration of MEMS and Intelligent Electronics、P-22、2008. 8. 23、Nihon University
- ③小倉泉、乳井嘉之、安部真治、根岸徹、篠田之孝、圓谷光徳、肥後尚志、光ヘテロダイン干渉法を用いた教育用模擬CTシステムの検討、電気学会計測研究会、IM-08-26、平成20年5月30日、さんかく岡山

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小倉 泉 (Ogura Izumi)
首都大学東京・人間健康科学研究科・教授
研究者番号：50204160

(2) 研究分担者

安部 真治 (Abe Shinji)
首都大学東京・人間健康科学研究科・教授
研究者番号：80192996
乳井 嘉之 (Nyui Yoshiyuki)
首都大学東京・人間健康科学研究科・助教
研究者番号：20279780

(3) 連携研究者

篠田 之孝 (Shinoda Yukitaka)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号：80215988