

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K01140

研究課題名（和文）教育用画像再構成補助ツールキットの開発

研究課題名（英文）Development of an educational image reconstruction aid toolkit

研究代表者

乳井 嘉之（NYUI, Yoshiyuki）

東京都立大学・人間健康科学研究科・准教授

研究者番号：20279780

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はデジタルトモシンセシスの諸特性を把握することが可能な画像再構成ツールを開発することが目的である。本研究では物質中での様々な放射線挙動を模擬することができるモンテカルロ計算コードPHITSを用いて投影データを作成した。そして、トモシンセシスの画像再構成アルゴリズムを組み込むことによって専用の装置がない施設においてトモシンセシスの諸特性を把握することが可能な教育用補助ツールを作成することを目的とした。本研究の結果より、疑似的にデジタルトモシンセシスの画像再構成を行うことによって、専用の装置がなくてもデジタルトモシンセシスの諸特性を把握することができることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本ツールを学生教育に適用することによりトモシンセシス専用の装置を所有していない教育施設においても疑似的にデジタルトモシンセシスの画像再構成を体験することができる。さらに実機では変更できない再構成パラメータを任意に変更することができるため、簡易的にデジタルトモシンセシスの諸特性を把握することができ、教育補助ツールとして効果的なものになると期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop an image reconstruction tool that enables us to understand the various characteristics of digital tomosynthesis. In this study, the projection data were generated using the Monte Carlo code PHITS, which can simulate various radiation behaviors in materials. The aim of this study is to create an educational aid that can be used to understand the various characteristics of tomosynthesis in facilities without dedicated equipment by incorporating the image reconstruction algorithm of tomosynthesis. The results of this study suggest that the characteristics of digital tomosynthesis can be understood even in the absence of dedicated equipment by performing pseudo-digital tomosynthesis image reconstruction.

研究分野：医用画像情報学

キーワード：教育支援システム デジタルトモシンセシス 画像再構成

1. 研究開始当初の背景

近年、病変部を高い空間分解能で正確にとらえる事ができるフラットパネルディテクタ(FPD)を搭載した X 線撮影システムが急速に普及している。これによりトモシンセシスはデジタルトモシンセシスとして、改めて臨床的に有用な技術として再認識されるようになってきた。これまで X 線撮影装置を用いた断層撮影法は、主に胸部や整形外科領域および耳鼻科領域で利用されていたが、X 線 CT 装置の飛躍的な進歩に伴ってトモシンセシスは衰退し過去の技術になりつつあった。しかし、現在では、トモシンセシスの利点が再認識されて、胸部検診や整形外科領域、そして、乳房検査の領域で有用な検査法として利用されるようになった。トモシンセシスは X 線 CT とは異なり、データの収集範囲が極端に限局されているため、深さ方向の情報量は X 線 CT 装置に比べて劣るものの、投影方向数が X 線 CT 検査に比べて極端に少ないため、放射線の被ばく線量を低減できる利点がある。このため放射線に対して感受性が高い臓器の撮影には X 線 CT 装置よりも効果的な撮影法である。

現在、臨床現場において脚光を浴びつつあるこの技術を習得するためには、デジタルトモシンセシス撮影ができる X 線撮影システムを用いた学内実習および実験が効果的である。ところが専用の装置を所有していない施設においては、デジタルトモシンセシスの撮影を行うことはできない。また専用の装置があっても投影角度および画像再構成で使用するフィルタ関数等の種々のパラメータを柔軟に変更させることができないため、研究等においてもパラメータの変更が制限されてしまう。

そこで専用のトモシンセシスの装置が無くても学内および実習実験等で簡易的にトモシンセシスの画像再構成を行うことができる教育用画像再構成補助ツールの作成を考案するに至った。本研究はシミュレーションツールをより実際の収集状況に近づけるためにモンテカルロ計算コードである PHITS¹⁾ (Particle and Heavy Ion Transport code System) を用いて投影データを作成し画像再構成を行った。

2. 研究の目的

本研究はデジタルトモシンセシスの諸特性を把握することが可能な画像再構成ツールを開発することが目的である。筆者がこれまで作成してきたシミュレーションツールは、数値ファントムを用いたシミュレーションにおいて、投影データは物質内の放射線の挙動を模擬したものでなく、単に X 線管焦点から検出器までを直線でコーンビーム状に広げて作成した投影データを用いて行ってきた。しかし、実際には放射線は物質中で様々な相互作用を起こし、かつ、統計的な揺らぎを生じる。そこで投影データをより現実的なものに近づけるために、本研究では、あらゆる物質中での様々な放射線挙動を模擬することができるモンテカルロ計算コード PHITS を用いて、投影データを作成した。そして、トモシンセシスの画像再構成アルゴリズムを組み込むことによって、トモシンセシスの装置がない施設においてデジタルトモシンセシスの諸特性を把握することが可能な教育用補助ツールを作成することを目的とした。

3. 研究の方法

はじめにモンテカルロシミュレーションで使用する X 線診断領域の連続 X 線を算出する必要がある。そこで本学に設置している X 線装置(図 2 : 島津メディカルシステムズ社の SONIALVISION Safire) から発生する連続 X 線を推定するために半価層の測定を行った。測定には半導体検出器(図 1 : PTWNOMEX マルチメータ)を用いて半価層の測定を行った。また半価層の測定の際には、後方散乱の影響を考慮し、図 2 に示すような幾何学的配置で測定を行った。さらに床面からの後方散乱の影響を再確認するためにシミュレーションでも確認を行った。

半価層測定時における SID は、140[cm]、コンクリート製の床面から検出器までの距離は 74[cm]、そして、撮影条件は X 線管電流を 200[mA]、照射時間を 20[msec]に固定して、X 線管電圧のみを 60[kV]から 90[kV]まで 10[kV]毎に変化させて測定を行った。なお、測定値は 5 回測定の平均値を採用した。

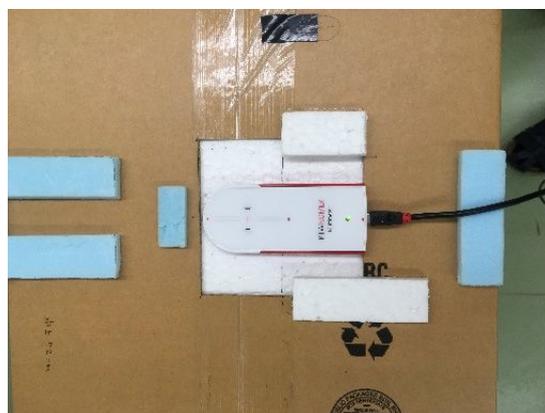


図 1. 半導体検出器(PTWNOMEX マルチメータ)

ここで測定により得られた半価層のデータは、X線装置固有の付加フィルタ、そして、X線管の絶縁油および不明確な吸収体を透過して照射される連続X線で取得されたものである。このため、この不明確な吸収体をAl当量として推定するためにXCOMP5を用いて推定した。Al厚は0.1[mm]ごとに変化させて、実測値と一致するAl厚を半価層との関係から算出し、連続X線のエネルギースペクトルを算出した(図3)。

次にモンテカルロシミュレーションコードPHITS(以下、PHITS)を用いて、後方散乱の影響をシミュレーションにて確認した。PHITSコードで実験体系を構築する際には、半導体検出器をSID:214[cm]に設置し、床面としてコンクリート(密度 $2.2[\text{g}/\text{cm}^3]$, 組成比: $^{14}\text{N}:75.5$, $^{16}\text{O}:23.2$, $^{40}\text{Ar}:1.3$)として設定した。そして、シミュレーションにより算出された空気カーマの値から吸収体がある場合と無い場合の比を計算して、後方散乱係数を算出した。照射野サイズとX線管電圧における後方散乱の影響については、照射野サイズを 5×5 , 10×10 , 20×20 , $30\times 30[\text{cm}^2]$ と変化させて、管電圧を60, 70, 80, 90[kV]のときの後方散乱係数を計算して検討を行った。また、床面と検出器間の距離の違いによる後方散乱の影響については、検出器の基準点0[cm]の位置を床面(コンクリート)として、床面からX線管焦点の方向に検出器を0, 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55[cm]と近づけて計算を行った。

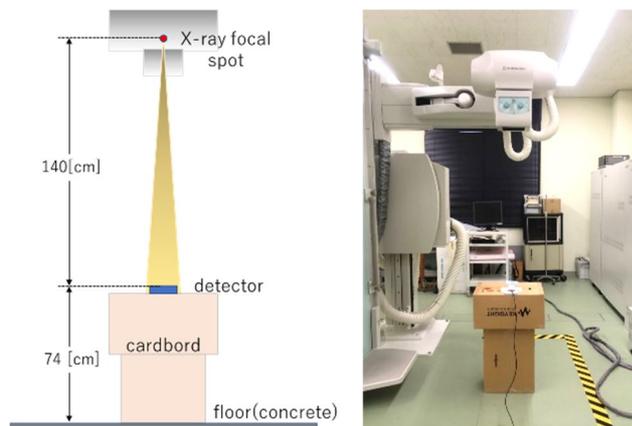


図2. 半価層測定時における幾何学的配置

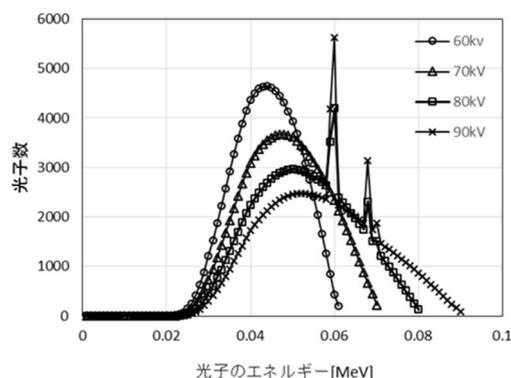


図3. 各管電圧における連続X線のエネルギースペクトル

4. 研究成果

図4に各X線管電圧と照射野サイズを変化させた場合の後方散乱係数の変化を示す。結果よりX線管電圧が高いほうが後方散乱係数は大きくなり、そして、照射野サイズは $30\times 30[\text{cm}^2]$ のときに最大値を示した。また、図5に床面から検出器までの距離を変化させた場合の後方散乱係数のグラフを示す。いずれの場合も後方散乱係数は床面から検出器の距離が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示した。シミュレーションの結果より、40[cm]以上距離を離すとX線管電圧の大きさによらず後方散乱係数は1.001となり、ほぼ無視できることが明らかとなった(図6)。

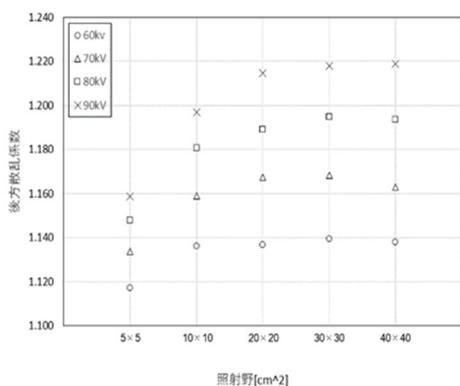


図4. 管電圧と照射野サイズにおける後方散乱係数

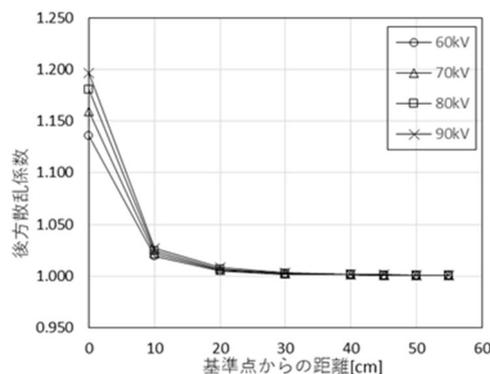


図5. 各管電圧の基準点からの距離の違いにおける後方散乱係数

これらの結果より X 線管電圧が 60[kV]から 90[kV]の領域においては、前述で算出した連続 X 線のエネルギースペクトルを適用しても問題がないことを明らかにした。また、X 線管電圧が 30[kV]以下の低エネルギー X 線スペクトルは、加藤らが開発した X 線スペクトル近似計算ソフト MoXS-3²⁾を使用して連続スペクトルの計算を行った。MoXS-3 は X 線管のターゲット角度や X 線管の傾斜角度などが任意に入力することができる。さらに X 線管のターゲット材質や付加フィルタは多種類用意されており、かつ、任意に選択することができる。本研究では表 1 に示す各種パラメータで、30[kV]以下の低エネルギー X 線スペクトルの計算を行った (図 7)。

表 1. X 線スペクトル作成時のパラメータ

X 線管ターゲット	タングステン(16 deg)
固有透過	ベリリウム(1.00 mm)
付加フィルタ	ロジウム(0.05 mm)
X 線管電圧	30 kV
SID	656 mm

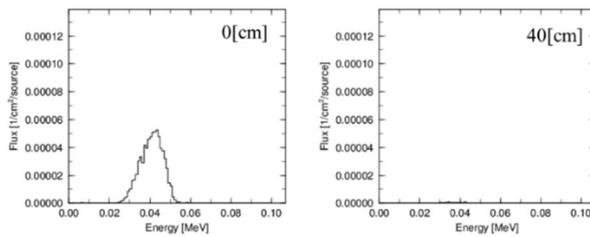


図 6. 散乱 X 線のエネルギースペクトル

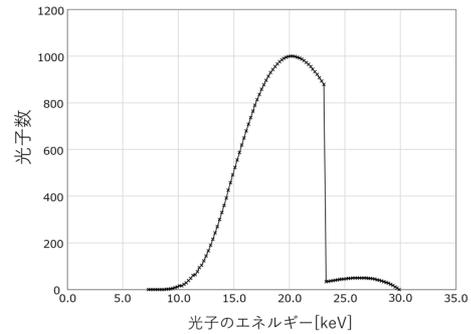


図 7. X 線管電圧 30[kV]の低エネルギー X 線スペクトル

図 8 に示すように PHITS 上で光子の輸送計算を行うために乳房装置を参考にジオメトリを作成した。SID は 656 [mm]に設定し、アイソセンターは検出器上面から 47[mm]上方に設定した。PHITS では構成物質を元素組成比で定義し、かつ、物体の形状や物質密度を入力することで任意の構造を作成することができる。本研究では、支持台には厚さ 1.7 mm のカーボンファイバーを設定した。これは JIS Z 4751-2-45 (203.10.1) の「X 線ビーム内に配置された、患者と X 線受像機との間の患者支持台 (全部の層の合計) の減弱当量は、これらの層に対して垂直に測定した場合に、0.3 [mmAl]以下でなければならない」という規定³⁾を満たす密度に設定した。また、検出器は直接変換方式の FPD を想定して、構成物質を Se としてシミュレーションを行った。撮影対象物体は ACR 推奨ファントムを数値ファントム化したものを採用した (図 9)。

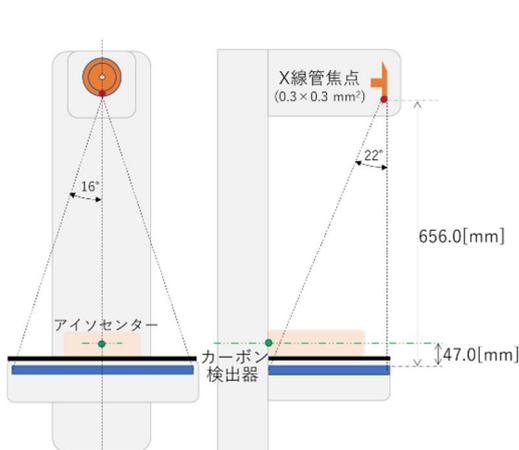


図 8. ジオメトリの概略図

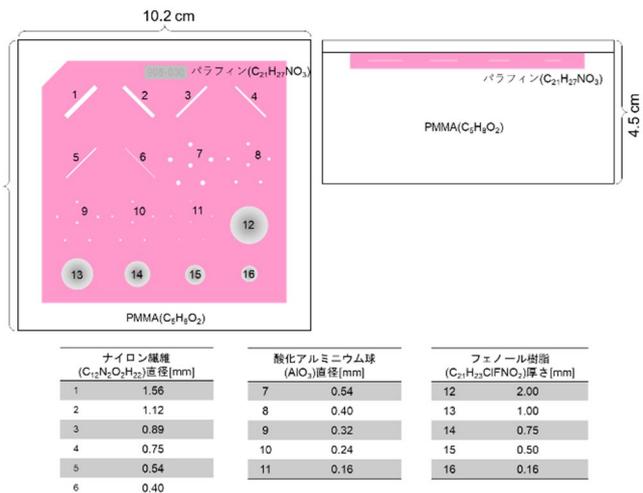


図 9. ACR 推奨 RMI-156 型ファントムの概略図および構成物質

図 10 に 9.0×10^9 個の光子を発生させてモンテカルロシミュレーションより取得した投影データ(0 度および+12 度)を示す。投影角は -12 度から +12 度とし、2 度ごとに 13 方向の投影データを取得した。そして、13 方向の投影データを用いて画像再構成を行った。検出器のピクセルサイズは 0.25×0.25 [mm²] として、再構成空間のボクセルサイズは、 $0.3 \times 0.3 \times 0.2$ [mm³] とし、FBP(Filtered back-projection)で画像再構成を行った。

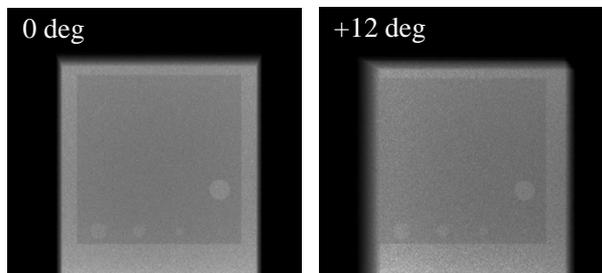


図 10. PHITS のシミュレーションより取得した 0 度方向と 12 度方向の投影データ

図 11 は図 9 に示すオブジェクトが留置されているスライス位置における再構成画像を示す。この再構成画像より、図 9 に示す構成物質が映像化されているのが確認できる。このように投影データをモンテカルロシミュレーションで計算することによって、より実機で収集されるデータに近い投影データで画像再構成することができ、疑似的にデジタルトモシンセシスの諸特性を体感することが可能となる。

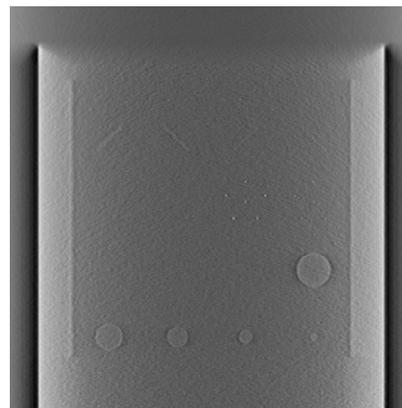


図 11. RMI-156 型数値ファントムの再構成画像影データ

さらに本研究では撮影対象物体を作成するために、X 線 CT 装置 Aquilion ONE(Canon Medical Systems)で、胸部、頭部、上肢および下肢ファントムを撮影して、RT-PHITS(Radio Therapy package based on PHITS)を用いて収集した DICOM データからボクセルファントムも作成した。

本研究で作成したデータを用いて疑似的にデジタルトモシンセシスの画像再構成を行うことによって、トモシンセシス専用の装置がなくてもデジタルトモシンセシスの諸特性を把握することができ、教育効果の向上を示唆した。

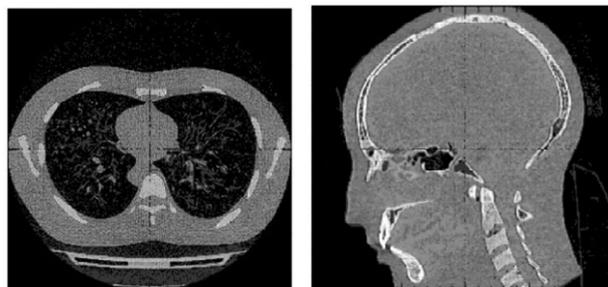


図 12. RT-PHITS で作成した胸部および頭部のボクセルファントム

< 引用文献 >

- 1) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690,2018.
- 2) 加藤秀起, 藤井茂久, 白川誠士, 他: モリブデンターゲット X 線管から放射される X 線スペクトルの推定計算式, 日本放射線技術学会雑誌, 67(3), 193-201, 2011.
- 3) 日本工業規格 JIS Z 4751-2-45, 32, 2017 .
- 4) Feldkamp LA, Davis LC, and Kress JW: Practical cone-beam algorithm. J. Opt. Soc. Am. A1, 6, 612-619, 1984.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀬在翔太, 村田一心, 乳井嘉之, 尾川浩一
2. 発表標題 GP-GPU を用いた光子輸送シミュレーションの高速化
3. 学会等名 第40回日本医用画像工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚郭貴、乳井嘉之
2. 発表標題 PHITSを用いたデジタルプレストモシンセシスの数値シミュレーションに関する基礎的研究
3. 学会等名 日本医学物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚郭貴、乳井嘉之
2. 発表標題 PHITSを用いたデジタルプレストモシンセシスの数値シミュレーションにおける誤差と投影データの関係
3. 学会等名 日本保健科学学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚郭貴、乳井嘉之、根岸徹
2. 発表標題 デジタルプレストモシンセシスを模擬したシミュレーションモデルの基礎的研究
3. 学会等名 日本放射線技術学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚郭貴, 乳井嘉之, 根岸徹, 松浦陽子
2. 発表標題 2-Dマンモグラフィ装置を用いた学生実験用トモシンセシス画像再構成の基礎的検討
3. 学会等名 日本医学物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚郭貴, 乳井嘉之, 根岸徹, 松浦陽子, 小倉泉
2. 発表標題 ウレタン樹脂製ファントムを用いた学生実験用トモシンセシスの基礎的検討
3. 学会等名 日本保健科学学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 乳井嘉之
2. 発表標題 デジタルトモシンセシスにおける逐次型画像再構成の基礎的検討
3. 学会等名 日本保健科学学会 首都大学東京荒川キャンパス(東京都・荒川区)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------