

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23602010

研究課題名(和文)照射位置・投与線量検証を可能にする多方向ガンマカメラシステムに関する研究

研究課題名(英文) A study on multidirectional gamma camera system for reconstruction of delivered position and absorbed dose distribution

研究代表者

齋藤 秀敏 (SAITOH, Hidetoshi)

首都大学東京・人間健康科学研究科・教授

研究者番号：50196002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高エネルギーX線による放射線治療において患者体内で発生するコンプトン散乱光子の情報を利用して、放射線治療の確かさ向上のための照射位置検出および投与線量分布再構成可能なガンマカメラシステムを開発することである。
この目的のためコンプトンカメラに着想し、シミュレーションによりその可能性を示した。また、原型となるシステム構築を目的として、コンプトン散乱光子のエネルギースペクトルおよび発生効率をシミュレーションにより求め、実験的に検証した。これらのデータを利用し、検出器、コリメータシステムおよび再構成アルゴリズムなどに関する基礎的研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：A purpose of this study is to develop a gamma camera system for reconstruction of irradiation position and delivered absorbed dose distribution using information of the Compton scattered photons from a patient during radiation therapy with high energy x-rays.
For this purpose the idea of Compton camera was taken in and the possibility was demonstrated by the simulation. Furthermore to design a prototype system, the energy spectrum and accumulation efficiency of the Compton scattered photons was simulated and confirmed experimentally. Using these data, the basic study related a detector, a collimator system and reconstruction algorithm was performed.

研究分野：時限

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：放射線治療 画像誘導放射線治療 体内線量分布再構成 コンプトンカメラ ガンマカメラ 散乱線 エネルギースペクトル scatter to primary ratio

1. 研究開始当初の背景

近年、技術の進展によって高精度な放射線治療が可能になった。今後、画像誘導放射線治療 (IGRT) によって、さらに幾何学的精度を向上させていくことが期待されている。この IGRT では、治療ビームと対向するイメージ検出器 (EPID)、あるいは治療ガントリーに診断エネルギー領域の X 線発生装置とイメージ検出器を取り付け、コーンビーム CT 技術により治療前の幾何学的位置合わせを行っている。

診療報酬上は「IGRT とは毎回の照射時に治療計画時と照射時の照射中心位置の三次元的な空間的再現性が 5 mm 以内であることを照射室内で画像的に確認・記録して照射する治療のことである」とされている。このため、毎回の治療ビームあるいは診断エネルギー領域の X 線で標的以外の広範な健常臓器に不要な放射線被ばくを与えることになる。さらに現状では、CT 撮影は治療前であり、照射中の標的の移動については検出する能力を持っていない。このため、治療中の標的位置、周囲の健常組織の位置を検出のための新たな方法の開発が求められている。

我々は、超並列コンピュータシステムを利用し、高精度吸収線量計算システム構築を研究目的の一つとした「放射線治療遠隔支援のための線量計算システム」に関する研究に参加してきた。(科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業応募研究領域、研究課題名「放射線治療の高度化のための超並列シミュレーションシステムの開発」研究代表者日本原子力機構 斎藤公明 平成 14 年度 - 平成 19 年度) このシステムは、超並列計算機によるモンテカルロシミュレーションによる吸収線量分布計算を行なうことができるが、さらに現実的な放射線治療における体内での一次線、散乱線の追跡へと発展させることができる可能性を持っている。

そこで、あらかじめ治療計画に使用した 3 次元 CT 情報を利用して、体外に放出される散乱線を治療前にシミュレーションして予測画像を作成し、ビーム方向とは異なる方向から治療中の散乱線画像を検出することにより体内位置情報を検証できるシステムを着想した。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、多方向から収集するコンプトン散乱光子の情報から照射位置検出、さらに強度変調放射線治療 (IMRT) 時の複雑な投与線量分布再構成の可能性を明らかにするシステムの開発である。

この目的のためコンプトンカメラに着想し、その可能性を実証するための検出器、コリメータシステムおよび再構成アルゴリズムに関する基礎的研究を行うことが本研究課題の目的である。

この研究目的から具体的には次の事項に関する研究を行うこととした。

- (1) 投与線量に影響を与える治療装置の出力線量変化の解析
- (2) 体内からのコンプトン散乱光子の特性解析
- (3) 体内不均質組織からの散乱光子情報による体内構造再構成の可能性の検討
- (4) ガンマカメラ (コンプトンカメラ) システムのプロトタイプ試作と評価
- (5) 多方向収集データからの三次元照射部位再構成、線量分布再構成および画像解析アルゴリズムの開発

3. 研究の方法

- (1) 投与線量に影響を与える治療装置の出力線量変化の解析

多方向収集データから 3 次元照射部位再構成を可能にするため、放射線治療時の患者透過光子線の定量性について検討が必要がある。投与線量は、治療対象となる標的体積の大きさ (照射野) 深さから算出される。このため、照射野の変化による出力線量の変化 (出力係数) およびその原因をシミュレーションにより明らかにする。

この目的のため、放射線治療装置からの高エネルギー光子出力をシミュレーションできる BEAMnrc モンテカルロコードを使用し、本研究で主に使用するリニアック (Clinac 21EX, Varian) の構造を忠実に再現し、出力線量に変化を与える要因を解析した。

- (2) 体内からのコンプトン散乱光子の特性解析

本研究の最終目的とするコンプトン散乱光子検出器システム、および同時使用の可能性のある EPID 検出器へ入射する散乱光子のエネルギースペクトルおよび散乱光子発生効率を明らかにする。

図 1 に示すような幾何学モデルを作成し、このシミュレーションのためのモンテカルロコードを新たに開発しコンプトン散乱光子の特性解析を行った。

また、EPID 検出器へ入射する散乱光子の特性解析には、前述のコードに加え、図 2 に示すような幾何学的配置により、治療装置、患者および検出器でそれぞれ発生する散乱線を分離することを目的とした線量計測、そしてシミュレーションの検証のためのエネルギースペクトル計測を行った。

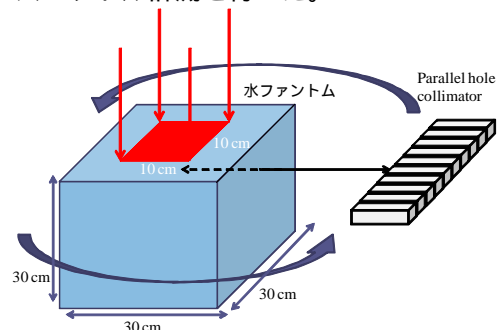


図1 シミュレーションの幾何学的配置

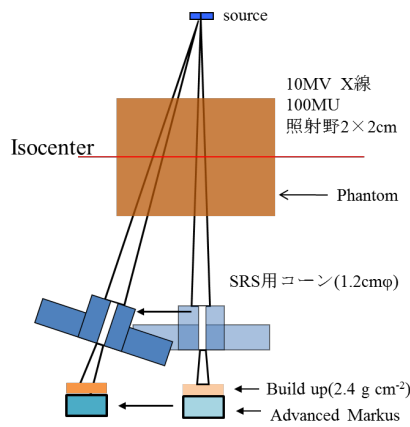


図2 患者透過光子に含まれる散乱光子を分離して計測するための幾何学的配置

(3) 体内不均質組織からの散乱光子情報による体内構造再構成の可能性の検討

前述の図1のシミュレーションコードに平行多孔型、ピンホール型などのコリメータシステムを付加できるよう発展させた。このモンテカルロコードにより体内でのコンプトン散乱過程をシミュレーションし、体外で散乱光子を収集し、ガンマカメラシステム実現の可能性を検討した。

(4) ガンマカメラ（コンプトンカメラ）システムのプロトタイプ試作と評価

本研究の最終目的であるガンマカメラのプロトタイプを試作した。試作モデルは、ピンホールコリメータ、プラスチックシンチレータ（またはNaIシンチレータ）による検出部、高感度CCDカメラ（または高感度デジタルカメラ）により構築した。患者位置の実写画像と散乱線によるシンチレーション分布をカメラで撮影し、位置ずれなしで患者位置の実写画像に散乱線によるシンチレーション光分布を重ね合わせる方法について実証実験を行った。さらに、この試作モデルの検出部をNaIシンチレーション検出器に置き換え、「2) 体内からのコンプトン散乱光子の特性解析」結果を検証するためのエネルギースペクトル計測を行った。

(5) 多方向収集データからの三次元照射部位再構成、線量分布再構成および画像解析アルゴリズムの開発

高い位置分解能、時間分解能をもつガンマカメラシステム構築が可能となった場合の利用として、三次元照射部位および線量分布再構成のためのアルゴリズム、画像解析の一環としてオプティカルフローによる動態追跡アルゴリズムに関する研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 投与線量に影響を与える治療装置の出力線量変化の解析について

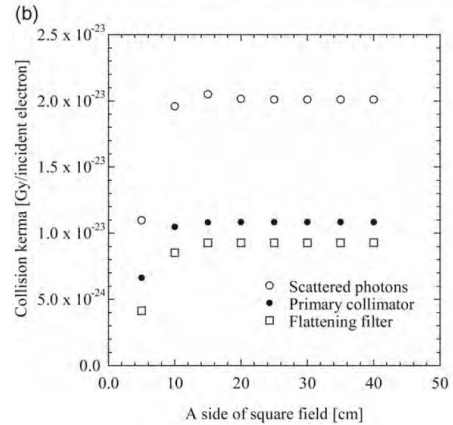
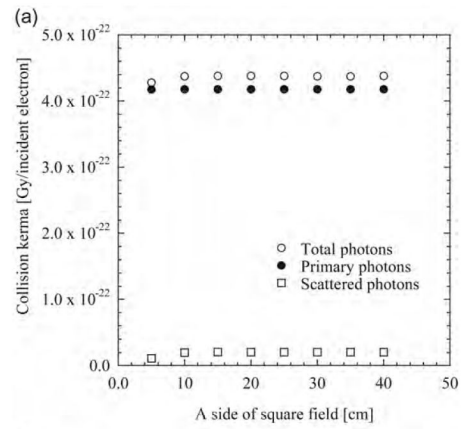


図3 (a) 治療ビーム中のターゲットからの一次線と治療ヘッドで発生する散乱光子数の照射野による変化、(b) 治療ヘッドからの散乱光子数の照射野による変化

図3に照射野の変化によるターゲットからの一次線および散乱線の変化、および治療装置の出力係数の原因をシミュレーションにより明らかにした。これらは、体内線量分布を再構成する目的には不要なノイズ混入評価の基礎データとして報告した。〔雑誌論文〕

(2) 体内からのコンプトン散乱光子の特性について

図4に患者体内から射出する散乱線量について、ビーム中心軸からの位置に対する散乱線量の変化を示した。

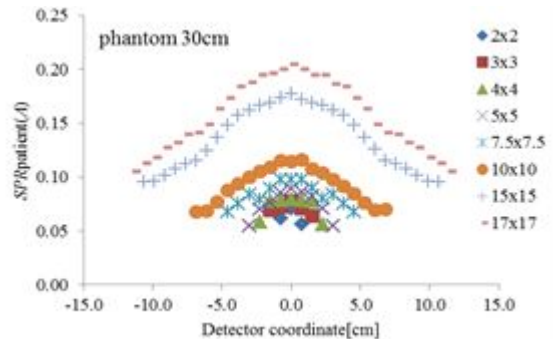


図4 ビーム中心軸からの位置による散乱線量の変化 (6 MV X線 ファントム厚 30 cm の例)

これらの結果より、治療装置、患者および検出器でそれぞれ発生する場所に分離して、EPID 検出器へ入射する散乱光子量を算出するための基礎データを得ることができた。(〔学会発表〕、)

(3) 体内不均質組織からの散乱光子情報による体内構造再構成の可能性について

水ファントムに高エネルギー光子を入射させ、90度方向に放出されるコンプトン散乱光子を多方向から収集した。収集データを利用し単純なバックプロジェクション法で再構成した照射野再構成の結果を示す。

このシミュレーションではさらに、現実的な6 MVのX線照射において、散乱角90°では最大エネルギーが0.5 MeV、最頻エネルギーは0.3 MeV程度となることが明らかになり、鉛を使用した場合1 cm以内の厚さで十分なコリメータを作成できることが示された。これらにより、「照射位置・投与線量検証を可能にする多方向ガンマカメラシステム」の可能性が示された。

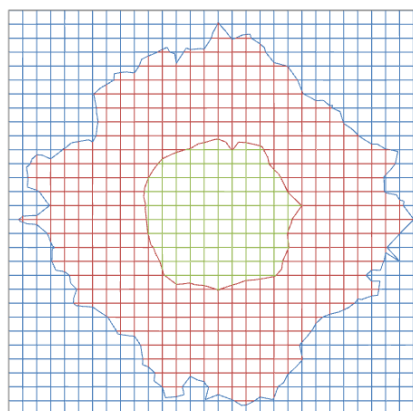


図5 バックプロジェクション法による照射位置の再構成図

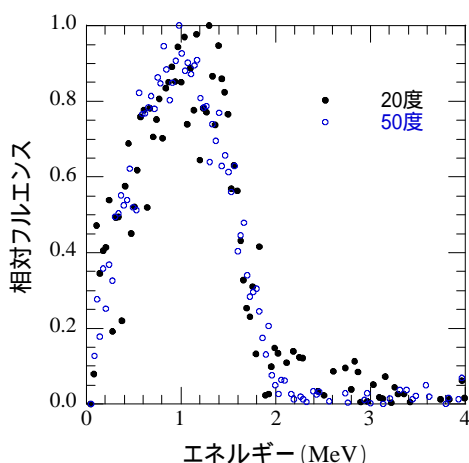


図6 NaI シンチレーション検出器によるコンプトン散乱光子のエネルギーフルエンス(6 MV X線の一部)

(4) ガンマカメラ(コンプトンカメラ)システムのプロトタイプ試作について

患者位置の実写画像と散乱線によるシンチレーション光分布を1台のCCDカメラで撮影し、重ね合わせる方法を考案した。この方法について、実写画像と散乱線によるシンチレーション光の相対強度の最適化と双方の画像の鮮鋭化の検討を行った。この結果、プラスチックシンチレータとCCDカメラの組合せでは発光量および感度が不足することが明らかになった。このため、シンチレータをNaIシンチレータに、受光部を高感度で広い受光面積を持つCCDを搭載した静止画カメラに置き換え、あらためて実証試験を継続している。

一方、この試作モデルの検出部をNaIシンチレーション検出器に置き換えたコンプトン散乱光子のエネルギースペクトル計測を試みた。通常の動作モードではNaIシンチレータでは同時に入射する光子数が多すぎるためエネルギースペクトルを直接計測することは困難である。このため、加速器のビーム電流を絞り込むことによって、NaIによるエネルギースペクトル計測を試みた。

図6にNaIシンチレータによる散乱光子のエネルギースペクトルの一例を示す。このような治療ビームのエネルギースペクトルの直接計測の報告は少ない。さらにエネルギースペクトル計測とシミュレーションによる研究を継続する予定である。(〔学会発表〕)

(5) 多方向収集データからの三次元照射部位再構成、線量分布再構成および画像解析アルゴリズムについて

高い位置分解能、時間分解能をもつガンマカメラシステム構築が可能となった場合の利用として、オプティカルフローによる肺がんの動態追跡アルゴリズムに関する研究成果を報告した。(〔学会発表〕、)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Miyashita H, Hatanaka S, Fujita Y, Hashimoto S, Myojoyama A and Saitoh H: Quantitative analysis of in-air output ratio, J. Radiat. Res., 査読有, vol. 54, no. 3, 2013, pp.553-560, doi: 10.1093/jrr/rrs118.

〔学会発表〕(計7件)

須田雄飛, 齋藤秀敏: A study of x-ray energy spectrum from medical linac by scattered photon analysis, 第107回日本医学物理学会学術大会, 2014.04.12, 横浜.

相川慶太郎, 齋藤秀敏: ブロックマッチングオプティカルフローを利用した肺腫瘍の動態解析ソフトウェアの開発, 日本保健科学学会第21回学術大会, 2011.10.15, 東京.

坂本岳士，池田郁夫，丸山靖，古屋二郎，村上晋也，高木正人，水野将人，齋藤秀敏：二次元検出器を用いた線量分布再構成のための散乱線寄与についての検討，日本保健科学学会第 21 回学術大会，2011.10.15，東京。

相川慶太郎，明上山温，齋藤秀敏：Optical flow computation for lung tumor respiratory motions using three dimensional block matching, 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, 2011.10.01, 福岡。

坂本岳士，池田郁夫，丸山靖，古屋二郎，村上晋也，高木正人，水野将人，橋本直也，齋藤秀敏：A basic study of dose distribution reconstruction using transmission X-ray, 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, 2011.09.30, 福岡。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 秀敏 (SAITOH, Hidetoshi)

首都大学東京・人間健康科学研究科・教授

研究者番号：50196002

(2) 研究分担者

藤崎 達也 (FUJISAKI, Tatsuya)

茨城県立医療大学・保健医療学部・教授

研究者番号：00285058