

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32620

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K19211

研究課題名(和文)放射線治療用コーンビームCTの散乱線除去グリッドの開発

研究課題名(英文)Development of antiscatter grid for cone-beam computed tomography in radiation therapy

研究代表者

臼井 桂介 (USUI, Keisuke)

順天堂大学・医学部・助教

研究者番号：20714132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：汎用型放射線治療装置に付随するコーンビームCT(CBCT)への散乱線を効果的に除去することが可能となるX線グリッドの構造を検討した結果、カーボンを中間物質としたクロス型構造がCBCTの画質と散乱線除去の効果に有効であることを示した。しかし、この中間物質の存在がさらなる画質改善の妨げになることから、新たにダブルスリット型のグリッドを開発し、その有効性についてシミュレーションと実機による検証を行った。その結果、ダブルスリット型は画像信号の劣化が無く、効果的に散乱線を除去できることが示された。一方で、鉛箔の安定配置と鉛編を画像から除去することが不可欠であるという問題が残っている。

研究成果の概要(英文)：As a result of evaluating the structure of an antiscatter grid which can effectively reduce the scattered photons in the cone beam computed tomography (CBCT), we showed that a cross type structure with carbon intermediate fillings can be effective for image quality and scattered photon removal. However, since the existence of intermediate fillings degraded further improvement of image quality, a double slit type was newly developed and its effectiveness was simulated and investigated by actual experiments. As a result, we showed the effectiveness of the double slit type grid for reduction of scattered photons without degradation of the image signal. On the other hand, some problems that the stable placement of the lead strips and the removal process of these lead strips are still indispensable.

研究分野：放射線治療学

キーワード：コーンビームCT 画像誘導放射線治療 X線グリッド モンテカルロシミュレーション 画質評価

1. 研究開始当初の背景

汎用型放射線治療装置に装備された放射線治療用コーンビーム CT (Cone beam computed tomography: CBCT)では、治療時の照射精度を高めることが可能であるが、この CBCT 画像を利用して放射線治療時の体内線量値を正確に計算することが可能になれば、治療日毎の体内線量を治療直前に推定することができる。しかし、CBCT には被検体から発生した散乱線が雑音信号として検出され、再構成画像の画質を劣化させる。これにより画素値の定量性が失われ、この CBCT 画像を直接用いた体内線量の計算値は不正確なものとなる。

2. 研究の目的

本研究では、CBCT 画像の画質向上と画素値の定量性を高めるために、被検体から発生した散乱線が検出される信号値へ与える影響を低減させることが可能となる、放射線治療用 CBCT 専用の散乱線除去グリッドの開発を行う。そのため、以下の2項目について検討を進めた。

(1) モンテカルロ法による光子輸送シミュレーションにより、散乱線除去グリッドの構造と材質の検討を行うことで、放射線治療時の画像情報としての有効性に関して検証する。

(2) 設計したグリッドを制作し、実験による画質の評価を行う。本研究では、鉛箔を支持するための充填材を利用しない、新たな散乱線除去コリメータの開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、初期構想として薄い鉛箔をコーンビーム状に配置したクロス型の X 線グリッドを設計した。また従来は、この鉛箔を支持する中間物質としてアルミニウム (Al) が多用されているが、本研究では中間物質にカーボンファイバ (セルロース: $C_6H_{10}O_5$) を使用した。セルロースは Al と比較して X 線の透過率が約 40% 高いため、これにより直接線の減衰を最小限に抑え散乱線を効率的に除去することが可能となると考えられる。図 1 に本研究で設計したグリッドの外観図を示す。このグリッドの格子比は 20:1 であり、グリッド密度は 20 line pair (lp)/cm とした。図 2 にグリッドの内部構造の詳細を示す。

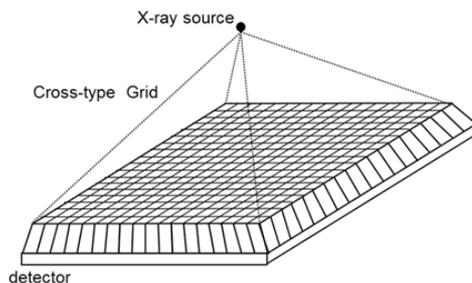


図1 CBCT用クロス型カーボングリッド外観

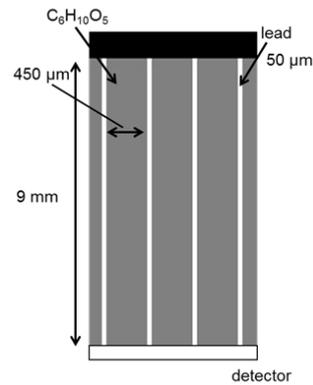


図2 クロス型カーボングリッドの構造

X 線グリッドの光子透過率の推定

散乱線の除去効果と直接線の減衰割合を推定するため、入射角度毎にグリッドへ到達する光子の透過率を求めた。ここではグリッドの表面から検出器に対して 0.1° 毎に入射角度を変化させ、透過する光子数を定量している。本検討では、 $C_6H_{10}O_5$ と Al を中間物質について検証した。またグリッドの格子比は 20:1 と 10:1 とし、鉛箔の構造はクロス型と平行型のグリッド構造を検討した。

シミュレーションによる画質評価

電子密度値が既知である 5 つの媒質 (肺, 軟骨, 骨, 脂肪および水) を挿入したファントム画像の投影データを光子輸送シミュレーションにより求め、各再構成画像の画質を評価した。図 3 にシミュレーションの外観図を示す。画質評価には、平坦性 (t_{cup})、コントラストおよび Contrast to noise ratio (CNR) を評価した。ここでは再構成画像の中心部と周辺部へ関心領域 (Regions of interest: ROIs) を設置し各評価値を算出した。また、各密度ファントム画像の画素値の定量性を評価するため、各媒質の CT 値を算出し、被検体からの散乱線を含まない直接線のみによる再構成画像から算出した CT 値との直線性を評価した。

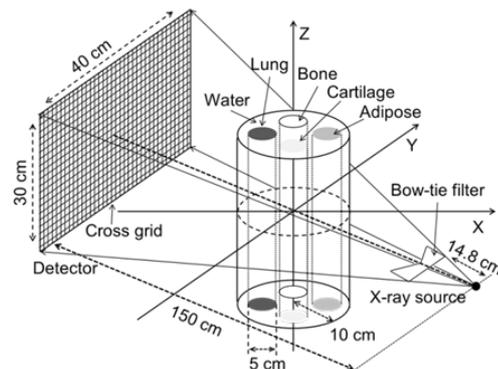


図3 シミュレーションの外観図

(2) 従来の X 線グリッドは、隔壁の保持のために充填材が必要になり、この充填材の部分で直接線の減衰が生じるという問題がある。一般的な充填材であるアルミニウムの代わりにカーボンファイバーを利用した場合でも、直接線は約 30% 減衰される。そこで本

研究では充填材を利用しない新たな散乱線除去コリメータの開発を行った。開発したコリメータは、0.1 mm 厚のタングステン板を 0.9 mm 間隔でコリメータ枠のガイドに沿ってはめ込むタイプのコリメータである。スリットコリメータは 1 方向のみしか散乱線の除去を行えないので、本研究ではスリットコリメータを x 方向、y 方向に交互に重ね合わせるにより散乱線の除去を行った。

シミュレーション

ここで提案するスリットコリメータの概念図を図 4 に示す。光子輸送シミュレーションを行い、提案するコリメータの有効性を検討した。シミュレーションのジオメトリを図 5 に示す。本シミュレーションは厚さ 20 cm の水のスラブファントムに対して、120 kV(フィルタ：アルミニウム 10 mm)の X 線による平行ビームのシミュレーションを行った。発生光子は原点におかれた $x=0$ の $y-z$ 平面 (256×256 pixels, 1.0×1.0 mm²/pixel) から 1 ピクセルあたり 100 万個発生させた。また検出器までの距離を 50 cm とした。検出器は 25.6×25.6 cm² で、ピクセルサイズを 1.0×1.0 mm² とした。比較のため、0.1 mm 厚の鉛で隔壁の内部をアルミニウムで充填したコリメータでかこまれた 0.9×0.9 mm² 孔を有する平行ホール型コリメータのシミュレーションも行った。散乱線の量を定量的に評価するために検出器の中心 64×64 pixels に ROI を設定し、プライマリ光子と散乱光子の平均値を求め、散乱線含有率 (scatter/primary) を算出し比較した。また、バーガーファントム、ステップファントムおよび Shepp ファントムによる画質評価を行った。

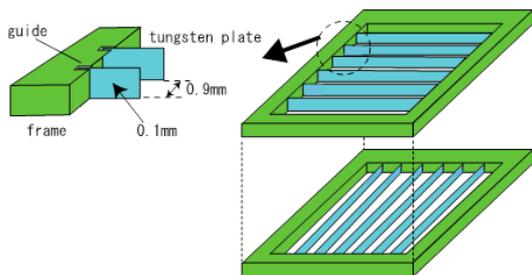


図 4 ダブルスリットコリメータの概念図

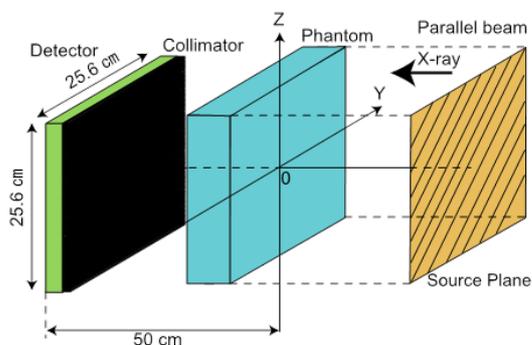


図 5 ダブルスリットコリメータの概念図

実験

試作した実機コリメータ (図 6) を用いての実験を行なった。実験条件を表 1、外観図を図 7 に示す。検出器は浜松ホトニクス製のフラットパネルセンサ (C7942CA-22) を使用し、X 線発生装置は浜松ホトニクス製のマイクロフォーカス (L9122) を使用した。本実験では京都科学の Hole 15 バーガーファントムを用いて画像評価を行なった。

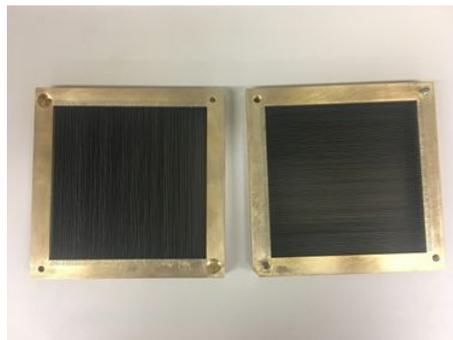


図 6 試作コリメータ (1 層ごとのスリット)

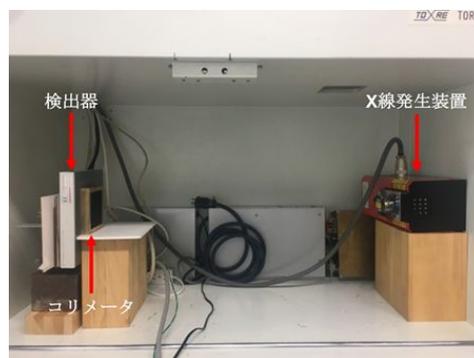


図 7 実験外観図

4. 研究成果

(1) クロス型 X 線グリッドの光子透過率
図 8 に各グリッドの光子透過率を示す。高格子比 (20:1) にすることで検出器に対して約 $\pm 1.4^\circ$ を超えて入射する光子の数をグリッドの鉛箔により減少させることが示された。さらに、中間物質に $C_6H_{10}O_5$ を使用した場合には、Al と比較して直接線の減弱を約 40% 抑えることが可能であることがわかった。

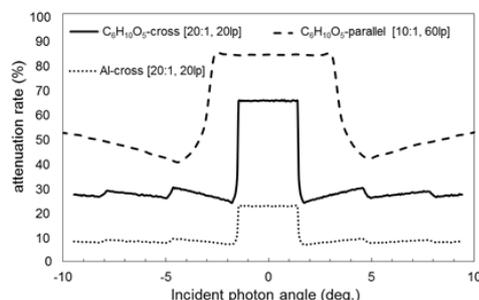


図 8 グリッドの入射角度に対する光子透過率

画質評価

図 9 にシミュレーションにて取得した再構成画像を示し、また表 1 に平坦性の結果を示す。グリッドを使用しない画像 (図 9 (a)) には

中心部の画素値が低下するカップリングアーチファクトが最も強く生じており、 t_{cup} は 139%と均一性が低下した。一方で、グリッドを使用することで画像内の均一性は改善し、高格子比ではそれぞれ 42, 44%となった。

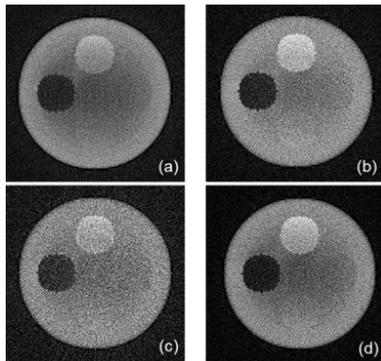


図 9 ファントムの再構成画像。(a): w/o grid, (b): $C_6H_{10}O_5$ -cross[20:1,20lp],(c):Al-cross[20:1,20lp],(d): $C_6H_{10}O_5$ -parallel[10:1,60lp].

表 1 画像平坦性の結果

Grid type	t_{cup} (%)
without grid	139
$C_6H_{10}O_5$ -cross [20:1, 20 lp/cm]	42
Al-cross [20:1, 20 lp/cm]	44
$C_6H_{10}O_5$ -parallel [10:1, 60 lp/cm]	64

図 10, 11 に各密度媒質から取得したコントラストおよび CNR の結果を示す。本研究で提案するクロス型カーボングリッドは最も良好な結果となり、グリッドを使用しない場合と比較してコントラストおよび CNR は、媒質間の平均値でそれぞれ 14.2, 22.6%改善した。一方で Al を中間物質としたグリッドでは、直接線の吸収が多いため画像内での散乱線成分が有意となることで、CNR が低下したと考えられる。さらに図 12 に、各密度媒質の CT 値の直線性の結果を示す。この結果から、本研究で提案するクロス型カーボングリッドの再構成画像から計算した CT 値が最も理想値に近いことが示されている。これにより CBCT 画像の画素値の定量性を高めることが可能になるため、CBCT 画像を直接利用した線量計算値の精度が高まることが期待できる。

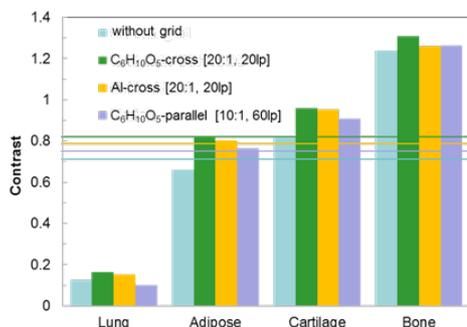


図 10 各密度媒質のコントラストの結果

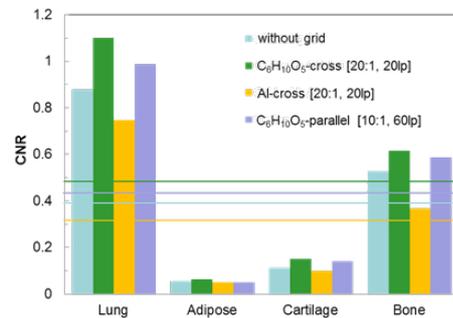


図 11 各密度媒質の CNR の結果

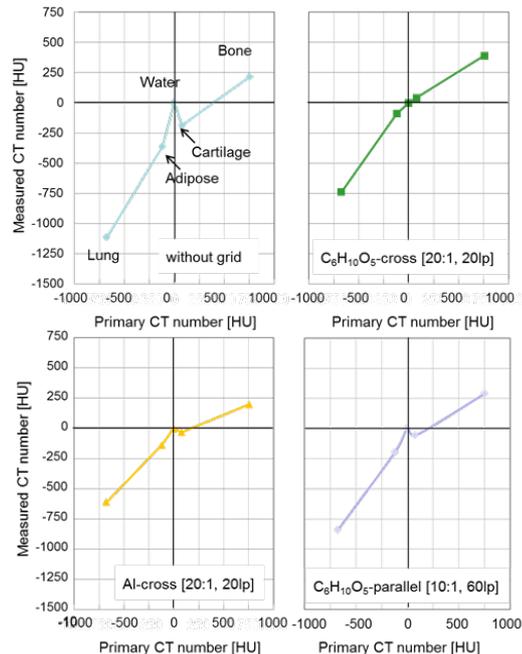


図 12 再構成画像から算出した CT 値の直線性

(2) シミュレーション

シミュレーションで得られた散乱線含有率を表 2 に示す。パラレルホール型コリメータの含有率が 0.40 となった一方で、提案したダブルスリットコリメータは 0.27 を示し、有効性が確認できた。

表 2 散乱線含有率

	primary	scatter	含有率
コリメータなし	16806.5	8577.2	0.51
パラレルホール	4292.8	1736.5	0.40
ダブルスリット	13620.1	3721.3	0.27

図 13 にパーガーファントム画像を示す。

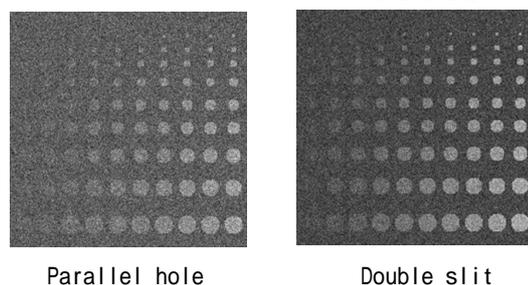


図 13 パーガーファントム画像

図 14, 15 にステップおよび Sheep ファントムのシミュレーション画像を示す。ダブルスリット型では、散乱線除去効果と直接線透過率の向上の結果、高いコントラスト分解能を得ることができている。

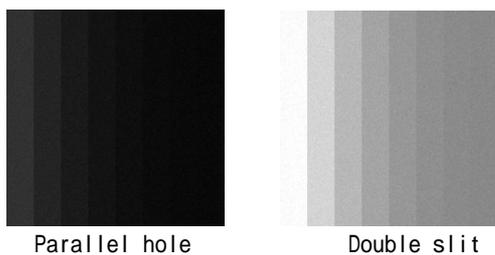


図 14 ステップファントム画像

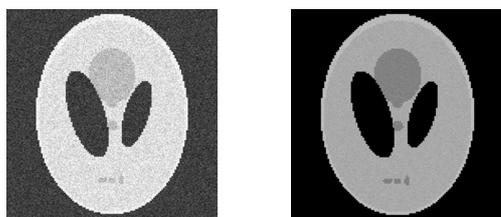


図 15 Sheep ファントム画像

実験

実験で撮影した X 線画像を図 16 に示す。ダブルスリットコリメータの画像にはタングステン板の箔間隔の乱れが発生した。この原因はタングステン板が薄すぎることにより歪んでしまうためだと考えられる。このため、コリメータによって発生する縞の抑制処理とコリメータ板の安定配置方法を再考する必要があると考えている。

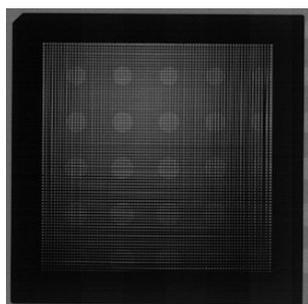


図 16 ダブルスリットコリメータ撮影画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

K.Usui, T. Inoue, C. Kurokawa, S. Sugimoto, K. Sasai, K. Ogawa, Analyzing the effect of scattered photons on cone beam computed tomography-based adaptive radiation therapy, International journal of radiation oncology biology physics, 査読有, vol.96,2016,E635.

K.Usui, T. Inoue, C. Kurokawa, S. Sugimoto, K. Sasai, K. Ogawa, Monte carlo study on a cone-beam computed tomography using a

cross-type carbon fiber antiscatter grid, 査読有, vol.43,3422,2016.

〔学会発表〕(計 4 件)

K.Usui, T. Inoue, C. Kurokawa, S. Sugimoto, K. Sasai, K. Ogawa, Analyzing the effect of scattered photons on cone beam computed tomography-based adaptive radiation therapy, American society for therapeutic radiology and oncology annual meeting, 9.26,2016,USA.

K.Usui, T. Inoue, C. Kurokawa, S. Sugimoto, K. Sasai, K. Ogawa, Monte carlo study on a cone-beam computed tomography using a cross-type carbon fiber antiscatter grid, American society of medical physics 58th annual meeting & exhibition, 7.31,2016, USA.

K.Usui, T. Inoue, T. Kawabata, H. Nagata, C. Kurokawa, S. Sugimoto, K. Sasai, K. Ogawa, Development of cross-type carbon fiber antiscatter grid for cone beam computed tomography in radiation therapy, 第 111 回日本医学物理学会学術大会, パシフィコ横浜, 2016 年 4 月 14 日, 神奈川県, 横浜市.

臼井 桂介, 井上 達也, 黒河 千恵, 杉本 聡, 笹井 啓資, 尾川 浩一, モンテカル口法によるコーンビーム CT へのクロス型カーボングリッドの有効性の検討, 第 35 回日本医用画像工学会大会, 2016 年 7 月 22 日, 千葉大学, 千葉県, 千葉市

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

臼井 桂介 (USUI, Keisuke)

順天堂大学・医学部・助教

研究者番号: 20714132

(2) 研究協力者

笹井 啓資 (SASAI, Keisuke)

順天堂大学・医学部・教授

研究者番号: 20225858

尾川 浩一 (OGAWA, Koichi)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号: 00158817