

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21611005

研究課題名（和文） エネルギー弁別能力を持つ X 線 CT の非対称フィルタによる実現

研究課題名（英文） An Implementation of Energy-selective X-ray CT using an Asymmetric filter

研究代表者

戸田 尚宏 (TODA NAOHIRO)

愛知県立大学・情報科学部・教授

研究者番号：00227597

研究成果の概要（和文）：X線管球からは幅広いスペクトルを持つX線が照射されており、物質の透過に伴うスペクトルの変化は多くの重要な情報を提供する。この情報を得る方法として、Dual-Energy CTが有望であるが、二種類の線質の異なるX線での測定を必要とする。以前の研究で、我々はファンビームCTに対して非対称な形状を持つ吸収フィルタを装着し測定を行う事で1回のスキヤニングでDual Energy法による再構成像を得る方法を提案している。本研究では、近年、主流となりつつあるコーンビームを用いた測定系に適用できる方法として、3次元非対称ステップ型非対称フィルタによる測定と逐次型再構成アルゴリズムを組み合わせる方法を提案した。コーンビームCTの普及に伴い、提案手法は比較的容易にエネルギー減弱特性の取得を可能としており、今後の医療診断の精度向上及び応用範囲の拡大に寄与できるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：X-ray tubes produce a broad spectrum of photon energies and a great deal of information can be derived by measuring changes in the transmitted spectrum. When Dual-energy computed tomography (DECT) obtains this information, it is a promising method. DECT can be achieved by two measurements at each beam line. Previously, we proposed an implementation method of DECT with an asymmetrical absorption filter (AF) on the fan-beam geometry; we called this method the asymmetric filter method (AFM). The advantage of this method is its simple implementation since only the absorption filters need to be replaced for multiple implementations. Furthermore, this method performs the measurement required by DECT in a one-time scan. Recently, cone-beam CT has become relatively widespread for high-speed measurements as it has a measuring range wider than that of the fan-beam CT. Therefore, in this study, we propose an extended version of the cone-beam AFM that combines a three dimensional step-type AF measurement and an iterative reconstruction method. Due to the spread of DECT, an implementation method with a suitable introductory cost for utility value is needed. The proposed method is a strong candidate to meet this need.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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： X線CT、X線エネルギー、Dual-Energy、コーンビームCT、非対称フィルタ

1. 研究開始当初の背景

物質のX線減弱係数はエネルギーに対して一様ではなく、診断領域X線(10~200[keV])ではエネルギーが大きくなるにつれ減少する傾向にあり、これは物質によって異なっている。すなわち、物質はX線領域においても固有の色彩を持っているといえる。人体各部におけるX線の減弱度合いをエネルギー、すなわち色毎に弁別できるならば組織同定に活用することができ、診断上極めて有用になるものと考えられる。

しかし、現在医療診断で用いられるX線CTにおいては、X線源として広いエネルギースペクトル分布を持つ管球が使用されているにもかかわらず、その再構成断層像は、CT値と呼ばれる濃淡のみの値で表現されるモノクロ画像であり、対象のエネルギー情報を捨て去っている。

エネルギー情報を取り出すといった観点にたった研究として、理論的には Alvarezら [Alvarez76]によるものがある。彼らは、1) 医療診断領域のエネルギーでは減弱係数が概ね二つの要素で表現できること、2) 異なる2種類のスペクトル分布を持つX線で測定を行えばエネルギー情報を取り出せることを明らかにした。この方法は、一般に Dual-Energy Method (以下DE法)と呼ばれている。DE法は、単純なエネルギーサブトラクション法と異なり、複数の異なるエネルギーの単一スペクトルX線源による同時撮影で得られる多くの画像と等価な情報を一度のスキヤニングで得られる点に大きな特徴がある。また、エネルギー毎に弁別されたそうした画像が得られるばかりではなく、ビームハードニングアーティファクトも発生しないという著しい特徴を持っている。

これまで DE法を実現する具体的な方法として、1) スキヤン中、高速に管電圧あるいはフィルタを切替える、2) エネルギー分析機能を持つ検出器を用いる、3) 放射光の利用、4) 複数の管球の同時使用、などが提案されているが、それぞれ実現上の問題を抱えており、骨密度測定などの応用例を除いて、医療診断分野においてエネルギー情報を利用する方式は未だ実用化されていないのが現状である。

我々は、CT装置のX線射出口に図1に示したような非対称な形状を持つ吸収フィルタ(図中 asymmetric filter)を装着し、測

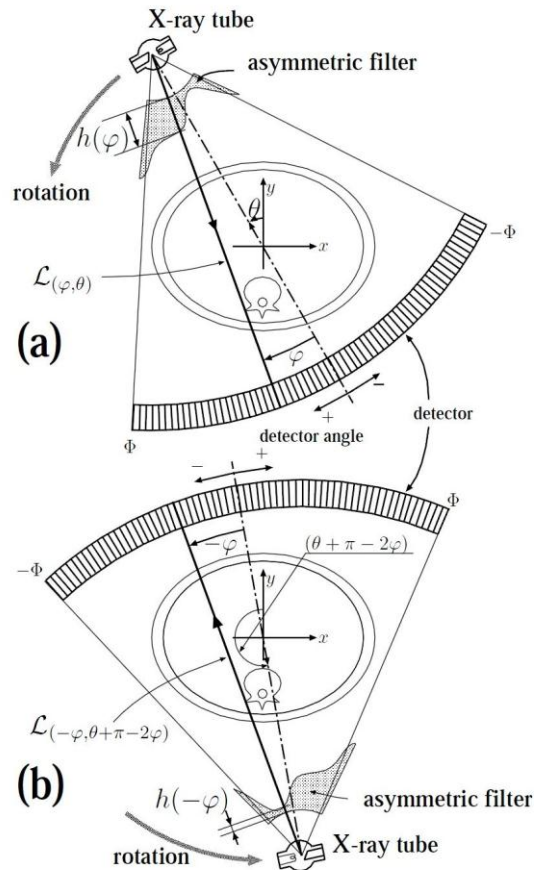


図1 非対称フィルタを装着したCT

定を行う事で1回(2π [rad])のスキヤニングでDE法による再構成像を得る方法を提案した。図中(a)に示したように管球の回転角度が θ の場合のファンビームX線のうち、検出角が φ の投影ビーム $\mathcal{L}(\varphi, \theta)$ は、同図(b)の管球回転角 $\theta + \pi - 2\varphi$ におけるビーム $\mathcal{L}(-\varphi, \theta + \pi - 2\varphi)$ とX線の方向は逆であるが、同じ部分を通過している。従ってこの二つの対向するビームで、異なるスペクトルのX線を照射できれば、DE法を実行できる。この対向ビーム対は管球から見ると常に対称な検出角度の関係にある。従って、これら二つの検出角度において、厚みが異なるように非対称な形状を持つフィルタを設置すれば、管球および検出器が1回転する間に全てのビームについて異なるスペクトルより2回ずつ計測できることになり、DE法の条件を満たす。

原理は極めてシンプルであり、管電圧やフ

フィルタを1回のスキャン中に切り替える必要はなく、複数の管球を用いる必要も無い。現

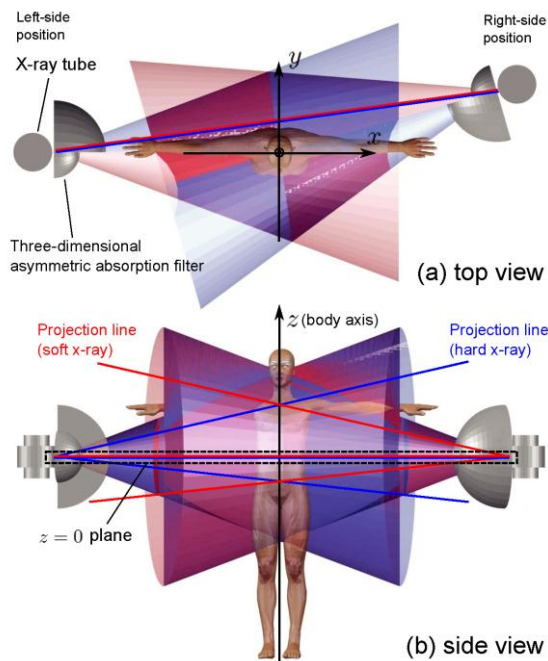


図 2 三次元非対称フィルタを装着したコーンビーム CT

行の CT では X 線照射口に何種類かの左右対称な線質調整フィルタが設置されている。この一つとして、非対称フィルタを導入することで、その他の CT の構成要素に関して一切変更せずソフトウェアの追加のみでエネルギー情報を持つ断層像再構成が可能となる。この方法を非対称フィルタ法と呼ぶ。

非対称フィルタ法の最大の利点は、既に病院等に設置されている装置においても安価に、かつ速やかに実施可能であることである。一方で、ステップ型非対称フィルタの場合、設置する際の取り付け精度が再構成断層像の画質に大きく影響すること、今後主流となるであろう 3 次元的な広がりを持つコーンビーム型の CT に対しては、中央断面のファンビーム以外の領域で対向ビームのずれが大きくなるため、上述した非対称フィルタの原理を拡張する必要がある、などの実用上の課題が存在する。

【他の研究者の文献】

[Alvarez76] R. E. Alvarez et al : “Energy-selective reconstruction in X-ray computerized tomography”, Phys. Med. Biol., Vol. 21, No. 5, pp.733-744, 1967.

2. 研究の目的

本研究では、前述した非対称フィルタ法の実用上の課題を克服するため、1)フィルタ形状及び設置、2)コーンビーム測定系への非対

称フィルタ法の拡張、3)コーンビーム測定系における散乱線の影響、の3つの観点から検討を進める。そして、得られた知見を統合することで実用上の問題を克服した、非対称フィルタによるエネルギー情報を利用できる X 線 CT の構成方法の構築を目的とする。

3. 研究の方法

研究は段階的に前節で提示した3つの課題を独自に進め、得られた知見を統合する形で作業を進めた。以下、それぞれの課題の内容を示す。

(1) 図 2 に体軸 (body-axis) 方向にフィルタ形状が変化しないステップ型の非対称フィルタ (以下、3 次元非対称フィルタ) によるコーンビーム測定系での特徴を説明するための概念図を示した。体軸方向からの特徴としては図 2(a) のようにファンビーム測定系と同様に対向ビームが存在していることがわかる。これに対して、体軸側面からの特徴は図 2(b) から分かるように、管球回転面 ($z=0$ plane) でのみ厳密に対向ビームが存在するが、それ以外の面については対向ビームを持たない。このことから、測定に用いた全ビームにおいて対向ビームは存在しないが、少なくとも撮像領域内の全ての位置は 2 種類の X 線が通過するという条件を満たす。この特徴を積極的に活用する事で DE 法を実現できる可能性は極めて高い。ここでは、そのような方針でコーンビーム方式への非対称フィルタ DE 法の拡張を行う。

(2) フィルタ取り付け位置の問題に対しては、取り付け位置がある程度変動したとしても、その変動の効果を吸収し得る形状のフィルタを設計するという方針に従う。具体的には、ステップ型ではなく図 1 に示したような滑らかに厚みが増減する形状とし、フィルタを交換する度に簡単なキャリブレーションを取る事に対応可能であると考えている。また、その際、皮膚被曝線量の低減を図るため、フィルタの縁を中央部より厚くする bow-tie 型となるよう、併せて設計問題を設定する。即ち、位置ずれに対して低感度でありかつ、皮膚被曝が最も少なくなるような最適化問題を解く事によりフィルタ形状を決定し、同時にそのフィルタを用いた場合の最適なアルゴリズムを開発する。

(3) コーンビームを用いると広い領域を一括に測定できることから、胸部の再構成において高い時間及び空間分解能を提供する。一方で、測定する領域の広がりに合わせて散乱線の影響も大きくなる。一般的に、散乱線は観測された値に対して加法的に加わり、その量は対象物の構造に依存し、また検出位置ごとに異なる。特に医療用 X 線 CT の場合、人体を観測する事が目的であり人体を平均化し

たファントムを用い校正曲線を求めることである程度補正する事は可能である。しかし、DE法で得られるエネルギー情報は、減弱係数を表す二つの要素の係数値である。得られる、これらの係数間には相関関係があり、この関

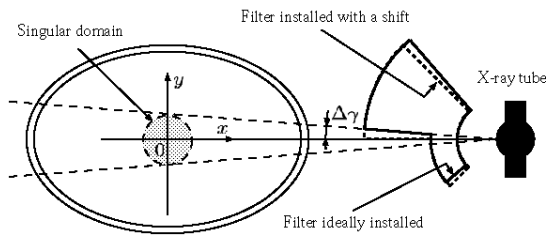


図4 フィルタ設置誤差と特異領域の関係

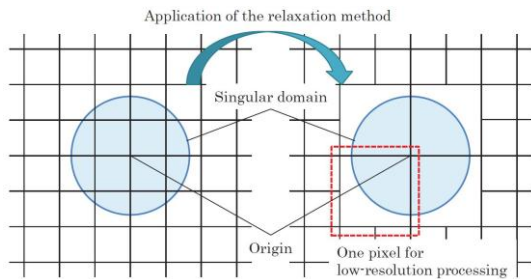


図3 局所的低分解能化処理の概要

係と定量性は密接に結びついている。この関係性は、X線測定の数値モデルの構造から定まるものであり、従来のモデル構造を意識しない校正方法では相関関係が消失、すなわちエネルギー情報を損失する恐れがある。本研究では、コーンビーム測定系を対象としており散乱線に関して特性を把握する必要がある。そこで、EGS5を用いたシミュレーションによる解析を進め、散乱線のエネルギー情報への影響について詳細な検討を進める。

4. 研究成果

以下、研究年度ごとに成果を提示し最後に研究成果の総括を示す。

(1) 2009年度の成果

X線ビームが2次元的な広がりしか持たないファンビーム方式のCTで検討してきた非対称フィルタ法を3次元的なコーンビーム方式のCTへ拡張していくことを主に検討した。2次元の非対称フィルタを3次元に拡張したフィルタを用いた場合、図2に示すように被験者体軸に垂直な平面で管球及び検出器が回転する構造では同一のビームラインを二種類のX線で測定することはできないため、通常の高効率なDE法を適用することはできないが、測定データ全体を用いた反復求解法によれば可能であることを、Fessler等の尤度を用いた評価関数を最小化する

O'Sullivan等のアルゴリズム[O'Sullivan 2007]を用いて数値実験により確認した。

(2) 2010年度の成果

2009年度に提案したコーンビーム測定系における非対称フィルタ法について、更に検討を進め、同じビームラインで2回の計測に基づきビームライン毎に非線形連立方程式を解く事でエネルギー分離を行う方式の場

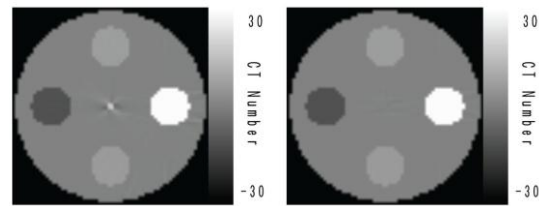


図5 局所低分解能化処理の効果。
(左：未適用、右：適用)

合、対称フィルタではDE再構成は不可能であるが、コーンビームの場合で本研究が採用する投影データ全体で尤度を評価基準とする反復アルゴリズムを用いる場合、フィルタの非対称性は必ずしも必要ではない。そこで、様々な形状の対称フィルタと非対称フィルタを設計し、数値シミュレーションにより解への収束の速度を評価基準としてどの形状のフィルタが適しているかという観点から極めて多数回のシミュレーションを実行した。その結果、急峻な立ち上がりを持つ非対称フィルタは如何なる対称フィルタを用いた場合よりも解への収束が速く、安定して再構成が可能である事が判った。

また、急峻な立ち上がり形状の非対称フィルタを実際のコーンビームX線射出口に装着する際、設置の精度によって再構成性能に大きく影響すると考えられる。即ち、図3に示すように設置位置の誤差が大きくなると管球の回転中心付近でスペクトル構造の異なるX線を照射できなくなる領域が大きくなってしまふ問題が考えられる。DE法においては、こうした領域が存在することは求解が不能となる事を意味する。本研究では、図4のように撮像領域を部分的に低分解能化する事で、そうした領域がある程度存在しても再構成に与える影響を極力少なくする方法を提案し、シミュレーションによりそれが有効に機能する事を確認した。図5がその一例であり、左が処理を適用しない場合、右が処理適用した場合の再構成画像であり原点近傍でのアーチファクトの消失を確認できる。

(3) 2011年度の成果

昨年度までの成果をまとめ電子情報通信学会論文誌に投稿し採録を得た。

また、3次元非対称フィルタによる再構成法は現時点では大規模な非線形最適化を用いるため、現実的サイズの画像に対しては計算時間の問題があるため、Fesslerらの尤度関数に基づき直接最適化する方法から、その改良と考えられるO'Sullivanらが提案しているI-Divergenceを評価関数として用いる方法に変更し、その基本的な性能を種々の

条件において数値的に検討した。その結果、I-Divergenceを用いる方法は比較的高速に解を求められることが判った。しかしながら初期値の設定方法や、収束パラメータの設定に関してさらなる検討が必要であることがわかった。

更に、モンテカルロシミュレーションは極めて計算時間が必要であるが、近年、利用が容易となってきたマルチコアCPUを用いてその並列化の効率について検討したところ、プロセス間通信を殆ど必要としないため、ほぼコア数倍の効率が得られることがわかり、今後、非対称フィルタ法の実装に向けたより詳細なシミュレーションが可能となる見通しを得た。また、2種類のX線による測定シミュレーションを行い、DE法での再構成を試みたところ散乱線の影響が従来のX線CT画像よりも強調され、空間分布及びエネルギー特性に依存する特性がある事が分かった。

(4) 総括

本研究では、近年、主流となりつつあるコーンビームを用いた測定系を対象にし、3次元非対称フィルタによる測定と逐次型再構成アルゴリズムを組み合わせることでエネルギー弁別能力を持つX線CTの実現方法を提案した。

提案手法に関して非対称フィルタの形状として非対称形状の実用上の有効性を示した。また、フィルタの設置精度に関する問題についてはフィルタ形状よりも容易に原点近傍での局所的な低分解能化処理で回避できることを示した。

更に、散乱線のDE法における影響についてはEGS5を用いた精密なCTシミュレータを構築し検討する枠組みを構築できた。これを利用し、DE法への影響に関して数値的な解析を行い再構成画像における空間依存性及び散乱成分の強調効果を確認した。

非対称フィルタ法には実装が容易といった利点があり、今後の普及が見込まれるコーンビーム方式に対応できた意義は大きい。今後の臨床現場におけるエネルギー情報の利用にあたって提案手法が活用され、診断精度向上に寄与するものと考えられる。

【他の研究者の文献】

[O' Sullivan 2007] J. A. O' Sullivan : "Alternating minimization algorithms for transmission tomography", IEEE Trans. Med. Imag., Vol. 26, No. 3, pp. 283-297, 2007.

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9件)

- ① S. Kondo, Shuji Koyama, In-Phantom Beam Quality Change in X-Ray CT : Detailed Analysis Using EGS5, KEK Proceedings (Proceedings of the Eighteenth EGS User's Meeting in Japan)、査読無、2011-6、2011、pp62-67.
- ② T. Haba, Shuji Koyama, Detail Analysis of Dose Distribution in Phantom in X-Ray CT using EGS5, KEK Proceedings (Proceedings of the Eighteenth EGS User's Meeting in Japan)、査読無、2011-6、2011、pp. 58-61.
- ③ D. Hayashi, Shuji Koyama, Accuracy validation of dose evaluation for dual energy CT, KEK Proceedings (Proceedings of the Eighteenth EGS User's Meeting in Japan)、査読無、2011-6、2011、pp. 15-19.
- ④ Kenta Tokumoto, Yoichi Yamazaki, Naohiro Toda, Effects of Scattering on the Reconstruction of Dual-Energy X-Ray CT, KEK Proceedings (Proceedings of the Eighteenth EGS User's Meeting in Japan)、査読無、2011-6、2011、pp. 7-14.
- ⑤ 山崎陽一, 戸田尚宏, 非対称フィルタによるコーンビーム Dual-Energy X線CT、電子情報通信学会論文誌 D、査読有、J94-D(7)、2011、pp. 1154-1164.
- ⑥ 山崎陽一, 戸田尚宏, 非対称フィルタによるコーンビーム Dual-Energy CTに関する実装上の検討、電子情報通信学会技術研究報告、MBE、MEとバイオサイバネティクス、査読無、110(460)、2011、pp. 31-36.
- ⑦ Shuji Koyama, Takahiko Aoyama, Nobuhiro Oda, Chiyo Yamauchi-Kawaura, Radiation dose evaluation in tomosynthesis and C-arm cone-beam CT examinations with an anthropomorphic phantom, Medical Physics、査読有、Vol. 37、2010、pp. 4298-4306.
- ⑧ Yuki Morishita, Shuji Koyama, Effect of the beam shaping filter in the X-ray CT simulation, KEK Proceedings (Proceedings of the Sixteenth EGS User's Meeting in Japan)、査読無、2009-6、2009、pp. 59-64.
- ⑨ Yuki Chujo, Shuji Koyama, Assessment of the validity of virtual grid using Mont Carlo code EGS5, KEK Proceedings (Proceedings of the Sixteenth EGS

User's Meeting in Japan)、査読無、2009-6、2009、pp. 65-69.

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 鍛島吉雅、エネルギー分析型検出器を用いた X 線 CT に関する研究、平成 23 年度愛知県立大学大学院修士論文発表会、2012 年 2 月 7 日、愛知県立大学.
- ② 徳本健太、モンテカルロシミュレーションによる Dual-Energy CT における散乱線の影響に関する検討、日本生体医工学会東海支部学術集会、2011 年 10 月 15 日、スズケン本社.
- ③ S. Kondo、In-Phantom Beam Quality Change in X-Ray CT : Detailed Analysis Using EGS5、The Eighteenth EGS User's Meeting in Japan、2011 年 8 月 11 日、高エネルギー加速器研究機構.
- ④ T. Haba、Detail Analysis of Dose Distribution in Phantom in X-Ray CT using EGS5、The Eighteenth EGS User's Meeting in Japan、2011 年 8 月 11 日.
- ⑤ D. Hayashi、Accuracy validation of dose evaluation for dual energy CT、The Eighteenth EGS User's Meeting in Japan、2011 年 8 月 10 日、高エネルギー加速器研究機構.
- ⑥ Kenta Tokumoto、Effects of Scattering on the Reconstruction of Dual-Energy X-ray CT、The Eighteenth EGS User's Meeting in Japan、2011 年 8 月 10 日、高エネルギー加速器研究機構.
- ⑦ 青山昌弘、Dual Energy CT における組織同定、電気関係学会東海支部連合大会、2011 年 9 月 27 日、三重大学.
- ⑧ 山崎陽一、非対称フィルタによるコンビーム Dual-Energy CT に関する実装上の検討、ME とバイオサイバネティクス研究会 (MBE)、2011 年 3 月 7 日、玉川大学.
- ⑨ 山崎陽一、非対称フィルタ法のコンビーム X 線 CT への拡張、日本生体医工学会東海支部学術集会、2010 年 10 月 16 日、スズケン本社 (名古屋).
- ⑩ 鍛島吉雅、Dual Energy CT に用いるエネルギー分析検出器のエネルギー分割数について、日本生体医工学会東海支部学術集会、2010 年 10 月 16 日、スズケン本社 (名古屋).
- ⑪ 鍛島吉雅、Dual Energy CT に用いるエネルギー分析検出器のエネルギー分割数について、電気関係学会東海支部連合大会、2010 年 8 月 30 日、中部大学.
- ⑫ Yuki Morishita、Simulation of X-ray CT using Monte Carlo method、The 3rd Asian and Oceanic Congress on Radiation Protection、2010 年 5 月 24 日、タワー

ホール船堀 (東京).

- ⑬ 上村亮太、非対称フィルタを用いたコンビーム CT における Dual-Energy 法の実現、平成 21 年度愛知県立大学大学院修士論文発表会、2010 年 2 月 18 日、愛知県立大学.
- ⑭ Yuki Chujo、Assessment of the validity of virtual grid using Mont Carlo code EGS5、The Sixteenth EGS User's Meeting in Japan、2009 年 8 月 7 日、高エネルギー加速器研究機構.
- ⑮ Yuki Morishita、Effect of the beam shaping filter in the X-ray CT simulation、The Sixteenth EGS Users Meeting in Japan、2009 年 8 月 7 日、高エネルギー加速器研究機構.

〔図書〕(計 1 件)

- ① 小山修司、オーム社、標準 X 線 CT 画像計測 (第 4 章「CT 検査における線量計測」、269 頁、pp. 252-265

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸田 尚宏 (TODA NAOHIRO)
愛知県立大学・情報科学部・教授
研究者番号 : 00227597

(2) 研究分担者

小山 修司 (KOYAMA SHUJI)
名古屋大学・医学部・講師
研究者番号 : 20242878