

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2002-357661  
(P2002-357661A)

(43) 公開日 平成14年12月13日 (2002. 12. 13)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テーマコード\* (参考)

G 0 1 T 1/161

G 0 1 T 1/161

E 2 G 0 8 8

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 7 頁)

(21) 出願番号 特願2001-163323 (P2001-163323)

(71) 出願人 396020800

科学技術振興事業団

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(22) 出願日 平成13年5月30日 (2001. 5. 30)

(71) 出願人 301032942

独立行政法人放射線医学総合研究所

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号

特許法第30条第1項適用申請有り 平成12年12月1日  
理化学研究所 加速器基盤研究部 マルチトレーサー研  
究会主催の「理研シンポジウム 生体微量元素2000」に  
おいて文書をもって発表

(72) 発明者 平澤 雅彦

千葉県千葉市稲毛区黒砂台三丁目4番12号  
稲毛ベルハウス305号室

(72) 発明者 富谷 武浩

千葉県千葉市中央区松波二丁目21番18号

(74) 代理人 100105371

弁理士 加古 進

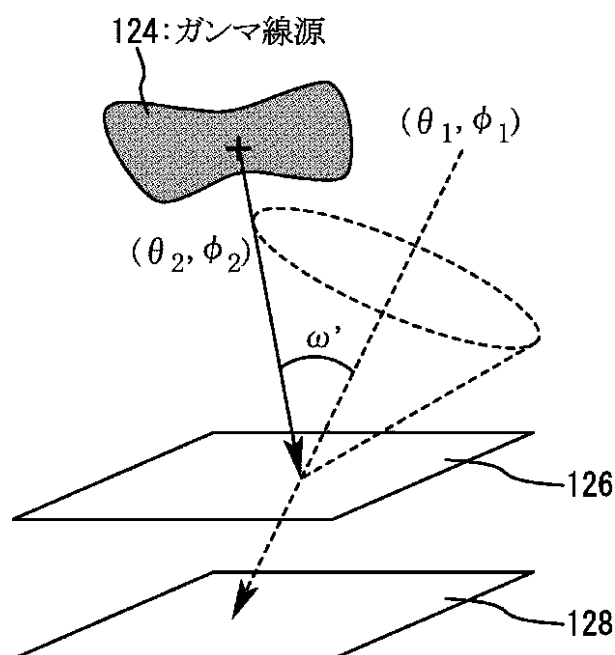
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ

(57) 【要約】

【課題】 ライン・プロジェクションを測定できるコンプトン・カメラの提供

【解決手段】 既知エネルギー・ガンマ線源124からのガンマ線を前面検出器126および後面検出器128で、それぞれコンプトン散乱位置、相互作用位置を検出している。ガンマ線源124から、前面検出器126へガンマ線が $(\theta_2, \phi_2)$ の角度で入射し、前面検出器126でコンプトン散乱(散乱角 $\omega'$ )が発生して、その散乱ガンマ線が後面検出器128に入射したところを示している。この散乱ガンマ線の飛跡方向は、前面検出器126と後面検出器128のコンプトン散乱位置と相互作用位置を結ぶ直線の方向 $(\theta_1, \phi_1)$ である。この場合、ガンマ線源124は、この直線 $(\theta_1, \phi_1)$ を中心線とする頂角(散乱角) $\omega'$ の円錐内の方向にある。これにおいて、積分方程式を立てて解くことにより、ガンマ線源のライン・プロジェクションを求める。





な解析的計算方法が提案されている。この多くの解析的計算方法は3次元計算機トモグラフィ(3次元CT)と呼ばれ、2次元のものは既に実用されている。しかし、ライン・プロジェクション導出型ガンマ・カメラはコリメータを用いるため、ガンマ線源からのガンマ線の利用効率が低いという欠点を持っている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、ライン・プロジェクションを導出するコンプトン・カメラを構築することにより、ガンマ線源からのガンマ線を効率よく利用しつつ、3次元CTの適用により、分布ガンマ線源の実用的な3次元分布画像構成等を可能とすることを解決課題とする。

【0004】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するための、本発明である、ライン・プロジェクションを導出するコンプトン・カメラを構築する。すなわち、本発明は、ガンマ線に対する前面検出器および後面検出器を有する、ガンマ線源を測定するコンプトン・カメラであって、前面検出器および後面検出器は、ガンマ線源に対する測定開口角が鋭角となるように構成し、前面検出器は、ガンマ線源から入射したガンマ線によるコンプトン散乱位置を測定でき、後面検出器は、前面検出器からのコンプトン散乱後のガンマ線の入射位置を測定でき、前面検出器および後面検出器による測定値を用いて、前面検出器からのガンマ線源のライン・プロジェクションを演算することを特徴としている。なおこの時、後面検出器は任意形状面とすることができる。ライン・プロジェクションは、多数の入射ガンマ線によるコンプトン散乱頻度分布関数を積分関数とし、実対称核をもつ第1種フレドホルム型積分方程式を、2乗可積分関数空間での線形作用素論を用いて解くことができる。このようなライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを、コンプトン・カメラに対して相対的に回転運動をしている分布ガンマ線源に対して用い、コンプトン・カメラから測定されたライン・プロジェクションに3次元CTを適用することにより、分布ガンマ線源の3次元分布画像を構成することができる。また、点状ガンマ線源に対して、ライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを2台平行に設置し、この2台のコンプトン・カメラにより測定された点状ガンマ線源に対するライン・プロジェクションから、点状ガンマ線源の3次元位置を特定することが可能となる。

【0005】

$$f'(\theta_1, \phi_1, \omega') \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{1}{\sin \omega'} f''(\theta_1, \phi_1, \omega') \quad (1)$$

：(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>)方向の逆方向の単位立体角への、散乱角θ'方向の単位立体角からの、コンプトン散乱相対頻

\*【発明の実施の形態】本発明の実施形態を、図面を参照して詳細に説明する。本発明は、ライン・プロジェクションを導出するコンプトン・カメラを構成し、それにより得られるライン・プロジェクションに3次元CTを適用し、実用的でガンマ線利用効率のよい、分布ガンマ線源の3次元分布画像構成法等を得るものである。本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラでは、前面検出器でコンプトン散乱した後、後面検出器でエネルギー付与相互作用をする既知エネルギー・ガンマ線の、前面検出器でのコンプトン散乱位置、および、後面検出器での相互作用位置のみを利用するものであり、ガンマ線源の位置を前面検出器の各検出素子からのライン・プロジェクション(直線上のガンマ線放射能の積算値)として限定するものである。これは、前後両検出器に高いエネルギー分解能を要求せず、かつ、ガンマ線利用効率のよいものとなる。ライン・プロジェクションが求められると、計算機トモグラフィを用いることにより、分布画像が求められることになる(例えば、斉藤恒雄「画像処理アルゴリズム」近代科学社 1993年等を参照されたい)。なお、ライン・プロジェクション導出等における計算は、計算機を用いて行うことができる。

【0006】図2を用いて、本発明中のライン・プロジェクション導出法について説明する。図2において、既知エネルギー・ガンマ線源124からのガンマ線を前面検出器126および後面検出器128で、それぞれコンプトン散乱位置、相互作用位置を検出している。図2では、ガンマ線源124から、前面検出器126へガンマ線が(θ<sub>2</sub>, φ<sub>2</sub>)の角度で入射し、前面検出器126でコンプトン散乱(散乱角θ')され、その散乱ガンマ線が後面検出器128に入射したところを示している。この散乱ガンマ線の飛跡方向は、前面検出器126と後面検出器128のコンプトン散乱位置と相互作用位置を結ぶ直線方向(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>)である。この場合、ガンマ線源124は、この直線(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>)を中心線とする頂角(散乱角)θ'の円錐内の方向にある。このような構成のコンプトン・カメラにおいて、以下の関数を定義する。なお、θは測定開角を示している。

【数1】f''(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>, ω')

：(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>)方向の逆方向の単位平方角への、散乱角θ'近傍の単位角内からの、コンプトン散乱相対頻度分布の確率密度関数(測定値/測定総数)

【数2】

度分布の確率密度関数

【数3】

$$f(\theta_1, \phi_1) \equiv 2\pi \int_{-1}^1 d(\cos \omega') f'(\theta_1, \phi_1, \omega') \quad (2)$$

：(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>) 方向の逆方向の単位立体角への、コンプトン散乱相対頻度分布の確率密度関数

【数4】 g(θ<sub>2</sub>, φ<sub>2</sub>)

：(θ<sub>2</sub>, φ<sub>2</sub>) 方向の単位立体角内の物質から、原点の周りの単位面積に向けて放射される、放射線量相対分布の確率密度関数（求解；相対ライン・プロジェクション）

\*【数5】 h(cos ω)

：散乱角 ωでのコンプトン散乱の微分断面積 / 全断面積（例：クライン・仁科の式）

上述のように、定義した式を用いると、解くべき方程式は、以下ようになる。

【数6】

$$f(\theta_1, \phi_1) = \int_a^1 d(\cos \theta_2) \int_0^{2\pi} d\phi_2 h(\cos \omega) g(\theta_2, \phi_2) \quad (3)$$

$$\cos \omega \equiv \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (4)$$

$$g(\theta_2, \phi_2) = 0 \quad (\theta_2 > \alpha; a \equiv \cos \alpha) \quad (5)$$

【0007】この方程式は、第1種フレドホルム (Fredholm) 型積分方程式の1つで、この方程式の積分核である h(cos ω) は、(θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>) および (θ<sub>2</sub>, φ<sub>2</sub>) に関して対称な実数値関数である。実対象核を持つ第1種フレドホルム型積分方程式は、要素が2乗可積分関数である、無限次元のヒルベルト空間における線形

$$f(t) = \int_S du K(t, u) g(u)$$

これにおいて、以下の解法により、g(u) を求める。まず、{φ<sub>i</sub>(u)} を、S上の任意の複素正規直交完備関数系とする。これを用いて、n次正方行列A<sub>n</sub>の要

$$a_{ij} \equiv \int_S dt \int_S du \phi_i(t) K(u, t) \phi_j(u) \quad (7)$$

この正方行列A<sub>n</sub>をJordan標準形A<sub>n</sub>で書き表すと、

$$A_n = B_n \lambda_n^{-1} B_n \quad (8)$$

となる。ここで、c<sub>i</sub> を以下のように定義する。

【数10】

$$c_i \equiv \int_S dt f(t) \overline{\phi_i(t)} \quad (9)$$

$$g(u) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ (c_1, \dots, c_n) B_n \lambda_n^{-1} B_n \begin{pmatrix} \phi_1(u) \\ \vdots \\ \phi_n(u) \end{pmatrix} \right] \quad (10)$$

【0008】式(10)の計算においては、式(7)、式(8)は、事前に計算しておくことが可能であるため、規定時間のf(t)の測定後、式(9)を順に計算し、式(10)が十分に収束したところで計算を終えることができる。上述の複素正規直交完備関数系としては、例えば、単位球面上の実球面調和関数Y<sub>nm</sub>(θ, φ)を用いることができる。この実球面調和関数Y<sub>nm</sub>(θ, φ)は、図3に示されている。この解法は、使用する複素正規直交完備関数系を適当に選ぶことにより、

作用素論の中で取り扱うことができる。以下に、上述の第1種フレドホルム型積分方程式の解法を一般化された形式で説明する。さて、解くべき実対称核K(t, u)を持つ第1種フレドホルム型積分方程式は、以下のよう

【数7】

$$(K(t, u) = K(u, t)) \quad (6)$$

素a<sub>ij</sub> を以下のように定義する。

【数8】

【数9】

これを用いて、g(u)は、以下の計算で求めることができる。

【数11】

任意の測定開角θ<sub>1</sub>に適用することが可能であり、実用的なコンプトン・カメラにおける鋭角の測定開角(0 < θ<sub>1</sub> < 90°)に対して適用することができるだけでなく、任意の形状の後面検出器に対しても適用することが可能である。さらには、この解法では、2重の検出器での相互作用位置情報のみを必要とし、検出器への付与エネルギー情報を必要としない。従って、この解法を利用する本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラは、前後両検出器に高いエネルギー分解能

を要求しない。

【0009】図4に、点状ガンマ線源に対し、本発明のコンプトン・カメラを適用した計算結果の例を示す。図4(a)、図4(b)、図4(c)は、同じ位置にある点状のガンマ線源に対して、計算次数を上げて、ガンマ線源の位置のシミュレーション結果を図示したものである。図4から分かるように、計算次数が上がるに従い、想定した点状ガンマ線源の位置に分布が収束して行っており、本発明のコンプトン・カメラでのライン・プロジェクション導出の正当性を示している。

【0010】

【実施例1】図5に、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラの実用的な検出器配置の例を示す。この例では、ヒト頭部134内のRIトレーサ(ガンマ線源)分布の診断例を示しており、図5(a)は上から見た上面図、図5(b)は横から見た側面図である。前面検出器136としては、例えば半導体ガンマ線検出素子を格子状に $35 \times 50$ 個並べたものを用い、後面検出器138としては $100 \times 100$ 個並べたものを用いている。そして、ヒト頭部134又はライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ側を回転させ、それぞれの位置におけるライン・プロジェクションを得、3次元計算機トモグラフィを適用し、RIトレーサの3次元分布画像を得ている。それぞれの検出素子の大きさを、ヒト頭部134を球で近似した直径をとして、例えば $100 \times 100$ とすると、理論的解像度としては、 $1/50$ を得ることができる。図5のような構成のものを、従来のSPECTと比較した場合、空間分解能はほぼ同じでありながら約100倍のガンマ線利用効率を持つことになる。これにより、被測定者および測定者の放射線被曝量を大きく抑えることができる。

【0011】【実施例2】図6は、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを利用した放射性物質漏出事故位置特定への応用例を示している。図\*

\* 6に示すように、比較的遠くにある放射性物質漏出事故位置141の3次元位置を特定するために、本発明によるライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ2台(142および144と、143および145)を平行において、それぞれのコンプトン・カメラで、放射性物質漏出事故位置の小範囲放射線源に対するライン・プロジェクションを求める。求めたライン・プロジェクションの交点が、放射性物質漏出事故の3次元位置となる。

10 【0012】

【発明の効果】上述のように、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラは、実用的な時間で放射線源のライン・プロジェクションを求めることができる。また、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラに使用するガンマ線検出器は、高いエネルギー分解能を必要としない。本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを用いることにより、高効率にガンマ線を利用しつつ、分布ガンマ線源の3次元分布画像を得ることができる。また、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを放射性物質漏出事故に適用することにより、ガンマ線を発生している事故位置を3次元的に特定することもできる。

【図面の簡単な説明】

【図1】コンプトン・カメラの二重球面型検出器と二重平面型検出器との比較を示した図である。

【図2】コーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラの原理を示したものである。

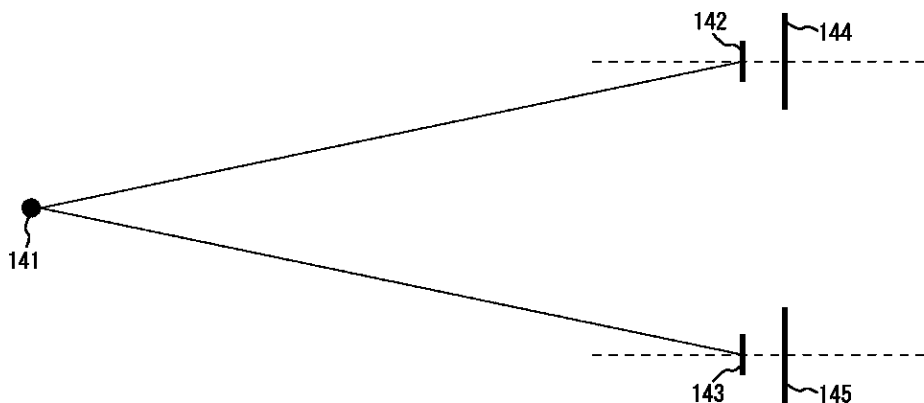
【図3】実球面調和関数系を示す図である。

30 【図4】点状ガンマ線源に対するシミュレーションの計算結果を示す図である。

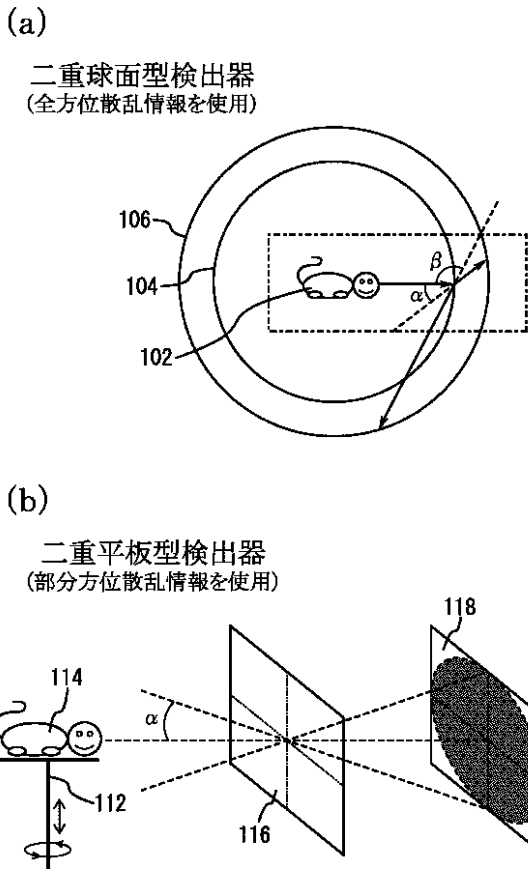
【図5】ヒト頭部診断に対する応用を示す図である。

【図6】放射線事故位置特定に対する応用を示す図である。

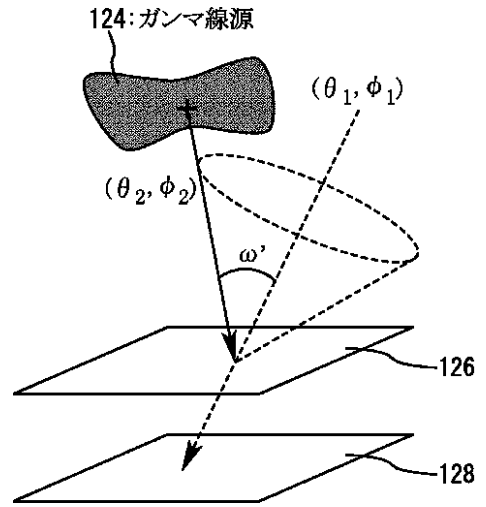
【図6】



【図1】



【図2】



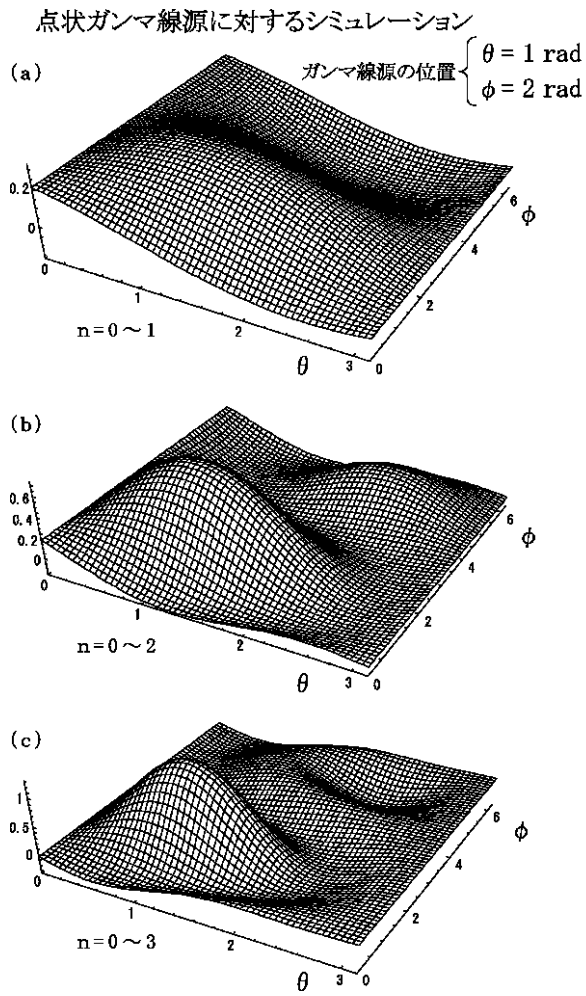
【図3】

実球面調和関数系

$$\begin{aligned}
 Y_{lm}(\theta, \phi) &\equiv \left[ \frac{2l+1}{4\pi} \right]^{\frac{1}{2}} P_l(\cos \theta) & m=0 \\
 Y_{lm}(\theta, \phi) &\equiv \left[ \frac{2l+1}{2\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} P_l^m(\cos \theta) \sin(m\phi) & 1 \leq m \leq l \\
 Y_{lm}(\theta, \phi) &\equiv \left[ \frac{2l+1}{2\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} P_l^m(\cos \theta) \cos(m\phi) & 1 \leq m \leq l
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} Y_{lm}(\theta, \phi) \\ Y_{lm}(\theta, \phi) \\ Y_{lm}(\theta, \phi) \end{aligned}} \right\} l \geq 0$$

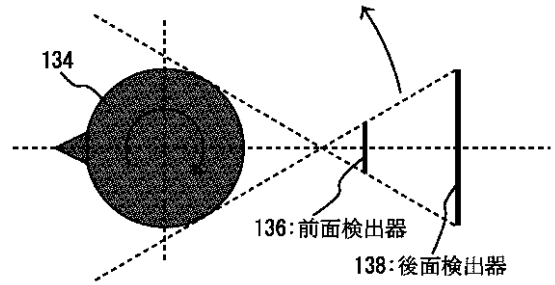
$$\left( \begin{aligned}
 P_l^m(x) &\equiv (-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m P_l(x)}{dx^m} \\
 P_l^{-m}(x) &\equiv (-1)^m \frac{(l-m)!}{(l+m)!} P_l^m(x)
 \end{aligned} \right) \quad (l \in (0, N), 0 \leq m \leq l)$$

【図4】

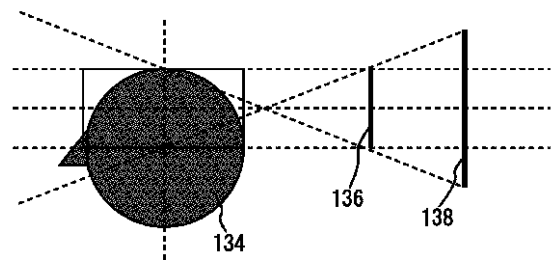


【図5】

(a) 上面図



(b) 側面図



フロントページの続き

(72)発明者 柴田 貞夫  
 千葉県柏市あけぼの四丁目10番18号

Fターム(参考) 2G088 EE02 FF04 KK33