

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2019年12月5日(05.12.2019)



(10) 国際公開番号

WO 2019/230740 A1

(51) 国際特許分類:

G01N 23/046 (2018.01) G01N 21/17 (2006.01)
A61B 6/03 (2006.01) G06F 17/16 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/021164

(22) 国際出願日: 2019年5月28日(28.05.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

特願 2018-101218 2018年5月28日(28.05.2018) JP

(71) 出願人: 国立研究開発法人理化学研究所
(RIKEN) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広
沢 2 番 1 号 Saitama (JP). 日産化学株式会
社(NISSAN CHEMICAL CORPORATION) [JP/

JP]; 〒1036119 東京都中央区日本橋二丁
目 5 番 1 号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 高 梨 宇 宙 (TAKANASHI, Takaoki);
〒3510198 埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研
究開発法人理化学研究所内 Saitama (JP). 野
田 茂穂(NODA, Shigeho); 〒3510198 埼玉県和
光市広沢 2 番 1 号 国立研究開発法人理化学
研究所内 Saitama (JP). 田村 勝(TAMURA,
Masaru); 〒3510198 埼玉県和光市広沢 2 番 1
号 国立研究開発法人理化学研究所内 Saitama
(JP). 大竹 淑恵(OTAKE, Yoshie); 〒3510198 埼
玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開発法
人理化学研究所内 Saitama (JP).

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR ACQUIRING TOMOGRAPHIC IMAGE DATA BY OVERSAMPLING, AND CONTROL PROGRAM

(54) 発明の名称: オーバーサンプリングによる断層画像データの取得方法、取得装置、および制御プログラム

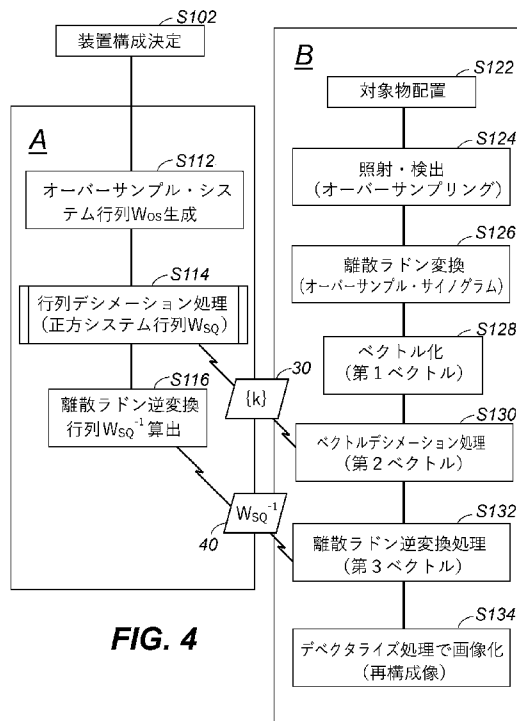


FIG. 4

- S102 Determine device configuration
S112 Generate oversampling system matrix W_{OS}
S114 Matrix decimation processing (square system matrix W_{SQ})
S116 Calculate discrete radon transform matrix W_{SQ}^{-1}
S122 Object arrangement
S124 Irradiation/detection (oversampling)
S126 Discrete radon transformation (oversample/sinogram)
S128 Vectorization (first vector)
S130 Vector decimation processing (second vector)
S132 Discrete radon transform processing (third vector)
S134 Imaging by de-vectorization processing (reconstructed image)

(57) Abstract: In order to increase reproducibility of a reconstructed tomographic image without increasing the computational load, during imaging for detection by N detection elements, detection is performed by oversampling in an (N + n) direction (S124, S126). A vector having $N \times (N + n)$ elements is determined (S128), and vector decimation S130 for removing a total of $n \times N$ elements corresponding to a sequence [k]30 in a thinning order. A

(74) 代理人: 岡本 正之 (OKAMOTO, Masayuki);
〒1410021 東京都品川区上大崎 3 丁目 1 2
番 2 5 号 # 1 0 2 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

corresponding discrete radon transform matrix $W_{SQ}^{-1}40$ is applied in a discrete radon transform step S132, de-vectoring is performed by image data generation S132, and tomographic image data are acquired. When oversampling is used, a discrete radon transform matrix W_{SQ}^{-1} is obtained, and a tomographic image is therefore obtained by matrix computation rather than by iterative approximation.

(57) 要約: 計算負荷を増大させずに再構築される断層画像の再現性を高めるために、本開示の実施形態では、N個の検出素子で検出する撮像の際、 $(N+n)$ 方向にわたるオーバーサンプリングにより検出する (S 1 2 4、S 1 2 6)。 $N \times (N+n)$ 個の要素をもつベクトルを求め (S 1 2 8)、間引き順の数列 $\{k\}$ 3 0 に当たる計 $n \times N$ 個の要素を除去するベクトルデシメーション S 1 3 0 を実施する。離散ラドン逆変換ステップ S 1 3 2 で対応する離散ラドン逆変換行列 $W_{SQ}^{-1}40$ を作用させ、画像データ生成 S 1 3 2 でデベクトル化して断層画像データを取得する。オーバーサンプリングを利用すれば離散ラドン逆変換行列 W_{SQ}^{-1} が得られるため、断層画像が逐次近似によることなく行列の演算により得られる。

明 細 書

発明の名称：

オーバーサンプリングによる断層画像データの取得方法、取得装置、および制御プログラム

技術分野

[0001] 本開示はオーバーサンプリングによる断層画像データの取得方法、取得装置、および制御プログラムに関する。さらに詳細には本開示は、オーバーサンプリングに基づく離散ラドン逆変換の効率の良い代数的手法を組み込んだ断層画像データの取得方法、取得装置、および制御プログラムに関する。

背景技術

[0002] X線、ガンマ線、光波などの透過性の電磁波や粒子線、または地震波やその他の任意の透過性を示す波または粒子を利用する断層撮像法（トモグラフィ）が実用化されている。その代表例が、医療、工業用途で用いられるX線CTスキャナー、SPECT（Single Photon Emission Computed Tomography）、光トモグラフィ（Optical Tomography）である。また、近年では可視光を用いた光学CT装置が開発されており、がんの放射線治療を行う前に、放射線線量の三次元分布検証のため、放射線照射後のゲル線量計を対象物とした撮像法が研究されている。これらの撮像手法で対象物の断層画像が得られる数学的原理はラドン変換である。この場合、対象物内部の各部の減衰率を撮像情報として外部に取出す処理がラドン変換によって記述され、対象物の断層情報を外界に撮像情報から再構成する処理がラドン逆変換によって記述される。すなわち、対象物で減衰した透過後の波または粒子の流れを照射方向または検出方向を変えて各位置で検出する操作がラドン変換に対応する。逆にその検出した方向別位置別の強度情報から対象物内部の各部の減衰率を推定して画像を再構築する操作がラドン逆変換に対応する。連続座標や連続方位でのラドン変換／ラドン逆変換は、現実の画像では有限画素数を扱うためサンプリングされた座標や方位で実行される。サンプリングした座標や

方位の下での画像再構成のためのラドン逆変換（離散ラドン逆変換）は多元の連立一次方程式を解くことつまり行列の演算に還元される。これらの数学的側面については標準的教科書に解説されている（例えば非特許文献1、2）。

[0003] 反復処理を行う逐次近似法（iterative reconstruction, IR）によってよりノイズやアーティファクトが軽減される手法も注目されている。その反復は、例えば100回またはそれ以上繰返すことにより解を得ている。このように代数的手法に頼って多元の連立一次方程式の近似解を得ることによって再構成像を得る手法はART（Algebraic Reconstruction Technique）と呼ばれている。ARTは、例えば、Maximum Likelihood - Expectation Maximization (ML-EM) 法、Additive - Simultaneous Iterative Reconstruction Techniques (ASIRT) 法、Multiplicative - Simultaneous Iterative Reconstruction Techniques (MSIRT) 法、と呼ばれる手法を含んでいる。従来のARTでは、計算量が膨大となり多量の計算資源を必要とする。また、イタレーションを重ねても、真の画像に対応する解に近づかず、局所解に捕獲されてしまうことも多い。他方、代数的手法にこだわらずに計算機での近似計算の効率を高め、現実的な計算資源で対処する手法も模索されてきた。この一例がFBP（Filtered Back Projection）である（例えば特許文献1）。FBPは代数的手法に比べ計算量が少ないことから現在X線CTスキャナーにおいて最も普及している。

[0004] 断層撮像法の発展経過では、初期から今日まで撮像画素数増大の要請が継続しており、FBPの可能性が探求されてきた。しかしFBPは、IRに比して種々のアーティファクトが顕われやすく再構成像の品質では一般に不利である。計算能力の発展が続く今日では、再構成像の品質で本来優位なARTも再び注目されている（例えば特許文献2）。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：国際公開第2014／021349号

特許文献2：国際公開第2013／105583号

非特許文献

[0006] 非特許文献1：Aviash C. Kak and Molcolm Slaney, "Principles of Computerized Tomographic Imaging," IEEE Press (1988)

非特許文献2：Stanley R. Deans, "The Radon Transform and Some of Its Applications," Krieger Publications (1983)

非特許文献3：Robert L. Siddon, "Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array," Medical Physics, vol.12, no.2, pages 252-255 (1985)

非特許文献4：Sunnegardh, J. and Danielsson, P.-E. "A New Anti-Aliased Projection Operator for Iterative CT Reconstruction," 9th International Meeting of Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, pages 125-127 (2009)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 画像の精細度の向上のための画素数増大への要請に加え、再構成像の品質に対する要請も弱まる気配がない。撮像画素数が増大した状況で従来のARTを採用しても、解くべき連立一次方程式の元（決定すべき変数）の数が増大してしまい膨大な計算資源が必要となり、その処理に長い時間を要す。このため従来のARTでの画像データ取得処理に実用性を求めるには、現状では計算能力の向上を待つしかない。特に、逐次近似に伴う反復計算を撮像の毎に再実行するような従来のARTの処理に頼る限り、例えば断層画像を多数得て三次元のボリューム像を得ることは現実的ではない。

[0008] 本開示は上記問題の少なくともいくつかを解決することを課題とする。本開示は、像の再構成を担う離散ラドン逆変換のために代数的厳密解の裏付けをもつような新たなサンプリング手法を採用することにより、高品質な断層撮像法に高い実用性をもたらすものである。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明者は、従来のARTの問題点がサンプリング（標本化）といった離散化手法に起因していることに気づいた。従来のARTでは、多元の連立一次方程式に重複する式が多数含まれてしまい、元（決定すべき変数）の数に対し利用できる方程式の数が実質的に足りなくなっている。このために逐次近似が必要となってプロセッサの計算能力による解決が指向されているのである。これに対し、本発明者は、離散化手法から再検討することにより、従来にないサンプリングと適切な処理とを組み合わせる上記課題への新たな解決手法を完成させた。

[0010] すなわち、本開示のある態様においては、少なくとも一列に並んだ N 個（ N は正の整数）の検出素子をもつ検出装置の検出範囲に対象物を配置するステップと、照射装置により前記検出装置に向けて前記検出装置の検出対象となる波または粒子を照射しながら、または照射装置によらずに生じた前記波または粒子を対象物の各部に透過させながら、前記対象物の各部を透過した後の前記波または粒子を前記検出素子それぞれにより受けて前記検出素子別の強度値を得る検出動作を、前記対象物からみた前記波または粒子の相対的な検出方向における互いに重複しない $(N+n)$ 方向（ n は1以上の整数）にわたって前記検出方向を変更して繰り返す検出ステップと、各行および各列を各検出方向および各検出素子に対応させた $(N+n)$ 行 N 列のオーバーサンプル・サイノグラムをベクトル化したものに相当する $N \times (N+n)$ 個の要素をもつ第1ベクトルを、前記検出動作における前記検出装置による検出信号から得るベクトル化ステップと、前記第1ベクトルから、間引き順に当たる計 $n \times N$ 個の要素を除去して、残りの $N \times N$ 個の要素をもつ第2ベクトルを得るベクトルデシメーションステップと、前記第2ベクトルに離散ラドン逆変換行列を作用させて、 $N \times N$ 個の要素をもつ第3ベクトルを得る離散ラドン逆変換ステップと、前記第3ベクトルをデベクトル化することにより、前記対象物に対して静止した画素配置をもつ N 画素 $\times N$ 画素の二次元断層画像のための画像データを得る画像データ生成ステップとを含む断層画像

データ取得方法が提供される。本開示のかかる態様においては、照射（投影）方向についてオーバーサンプリングとデシメーション（間引き）を組み合わせることにより、対称性の破れを意図的に生じさせて代数的手法による厳密な解の算出を可能性にしている。

[0011] また、本開示は、断層画像データ取得装置の態様としても実施することができる。同様に、本開示は、断層画像データ取得装置のための制御プログラムの態様でも実施することができる。

[0012] オーバーサンプリングまたはオーバーサンプル（oversample）とは、デジタル信号処理理論のサンプリングの概念に基づいており、基本となるサンプリングよりも高い密度でサンプリングをする処理をいう。特に本開示の各態様におけるオーバーサンプリングは検出方向について有効な検出素子の数 N を超えた数となる $N + n$ （ n は 1 以上の整数）の検出方向のサンプル点を互いに重複しないように選択して必要な角度範囲をサンプリングすることを含む。なお、以下特に断りのない場合の検出素子の数は有効なものを指すこととする。デシメーション（間引き処理）とは、オーバーサンプルされて得た行列の要素や対応するベクトルの要素のうち、少なくともいずれかをその後の計算処理に用いない（捨てる）処理を指している。これらを含め本出願においては、不明瞭にならない限り本開示の属する技術分野の慣用に従う用語法を採用することがある。波は電磁波、音波といった伝播による減衰を観念できる任意の波動を含み、光波（赤外、可視、紫外）、振動（地震など）を含む。粒子は、流れとなった粒子線において伝播による減衰を観念できる任意の粒子を含み、中性子線やその他の放射線も含む。電子や光子のように、量子力学的に波動性と粒子性を兼ね備えるものも、これらの波または粒子のいずれかまたは両方に含まれる。同様に、古典力学的に波動や粒子と捉えられるものも、これらの波または粒子のいずれかまたは両方に含まれる。これらの波または粒子は、それらの人為的な放出源となる装置（照射装置）により生成されるものであっても、また、例えば宇宙線などの自然由来で生成されるものや、例えば対象物の各部から放射される放射線などの対象物の性質

として生じるもの（本出願書面では「照射装置によらずに生じた波または粒子」と呼ぶ）であっても本開示の実施に用いることができる。

発明の効果

[0013] 本開示のある態様では、相対的に少ない計算資源を用いる場合でも高い精細度で高品質な再構成像を高速に実現することができる。

図面の簡単な説明

[0014] [図1]図1は従来の離散ラドン逆変換の代数的手法の原理を説明する説明図である。

[図2]図2は従来および本開示の実施形態の離散ラドン逆変換の代数的手法の原理を説明する説明図であり、図2A～Cは従来の手法を示し図2Dは本実施形態の工夫を示す。

[図3]図3は本開示の実施形態において画像が取得される一例の断層撮像装置において、画像が取得される対象物の切断面における平面配置を含む概略構成を説明するための模式図である。

[図4]図4は本開示の実施形態の断層撮像装置のうち制御装置において実施される処理を概観するフローチャートである。

[図5]図5は本開示の実施形態の断層撮像装置における処理のフローチャート（図4）の各段階で得られる行列やベクトル、または画像についての変遷を模式的に示す説明図である。

[図6]図6は本開示の実施形態における行列デシメーション処理を示すフローチャートであり、図6Aは乱択アルゴリズムによるもの、図6Bはグラム・シュミットの直交化法を採用するものである。

[図7]図7は、本開示の実施形態におけるブロックによるデシメーション処理を示す説明図であり、図7Aは、オーバーサンプル・システム行列 W_{Os} を画像により示し、図7Bは、ブロックでの間引き処理によって得た正方システム行列 W_{sQ} を同様に示したものである。

[図8]図8は、本開示の実施形態におけるブロックによるデシメーション処理の成果を示す説明図であり、図8Aは離散ラドン逆変換行列 W_{sQ}^{-1} であり、

図 8 B は、離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} を正方システム行列 W_{sq} に左から作用させて得られる行列を示す。

[図9] 図 9 は断層撮像装置によって本実施形態を実装する場合における制御装置のいくつかの特有の機能部と特有のデータ格納部を示すブロック図である。

[図10] 図 10 は本開示の実施形態のための実施例において、検証のために用いた検証用データ（数値ファントム）を示す図（図 10 A）および対応するオーバーサンプル・サイノグラム（図 10 B）である。

[図11] 図 11 は本開示の実施形態のための実施例において得られた再構成画像であり、本実施形態により求めたもの（図 11 A）、従来の FBP 法において Hann フィルターを用いたもの（図 11 B）、および従来の代数再構成法として逐次近似計算（ML-EM 法）を 30 回行って得たもの（図 11 C）である。また、図 11 D は比較のための基準とする単純な逆ラドン変換による再構成画像である。

[図12] 図 12 は本開示の実施形態における追加の画像再構成手法において、マウス標本を利用して取得した X 線 CT のデータによる再構成処理を行った事例を説明する説明図であり、図 12 A はマウス標本の写真、図 12 B は擬似逆行列 W_p^{-1} を利用した再構成画像、図 12 C は FBP による再構成画像、図 12 D は ML-EM による再構成画像、図 12 E は単純な逆ラドン変換による再構成画像である。

[図13] 図 13 は本開示の実施形態における追加の画像再構成手法において擬似逆行列 W_p^{-1} により生成した再構成画像を含んでおり、図 13 A ~ 図 13 J は各図に付す値にトレランス値を設定したものであり、図 13 K は、特異値を大きさ順に並べたグラフである。

[図14] 図 14 は本開示の実施形態における追加の画像再構成手法において、コンクリート標本を利用して取得した中性子線 CT のデータによる再構成処理を行った事例を説明する説明図であり、図 14 A はコンクリート標本の写真、図 14 B は擬似逆行列 W_p^{-1} を利用した再構成画像、図 14 C は FBP に

よる再構成画像、図14Dは $ML-EM$ による再構成画像、図14Eは単純な逆ラドン変換による再構成画像である。

[図15]図15は本開示の実施形態における追加の画像再構成手法において擬似逆行列 W_p^{-1} により生成した再構成画像を含んでおり、図15A～図15Jは各図に付す値にトレランス値を設定したものである。

[図16]図16は、本開示の実施形態における追加の画像再構成手法における擬似逆行列 W_p^{-1} の例であり、図16Aは、図7Bの正方システム行列 W_{sq} に対して求めた擬似逆行列 W_p^{-1} 、図16Bは、擬似逆行列 W_p^{-1} を正方システム行列 W_{sq} に左から作用させて得られる行列を示す。

発明を実施するための形態

[0015] 以下図面を参照し、本開示に係る断層画像撮像の実施形態を説明する。全図を通じ当該説明に際し特に言及がない限り、共通する部分または要素には共通する参照符号が付される。また、図中、各実施形態の要素のそれぞれは、必ずしも互いの縮尺比を保って示されてはいない。

[0016] 1. 原理

図1は、従来の離散ラドン逆変換の代数的手法の原理を説明する説明図である。この図は、波または粒子を照射し、透過後の強度データを用いて断層画像を再構築する処理の本質を示す初等的なものである。図示される縦 $2 \times$ 横 2 に並ぶ正方形領域はそれぞれが断層画像の画素を意図したもので、 $a_{11} \sim a_{22}$ の4つの値を持ちうる。これらの値は、各画素の位置での対象物によるビームの減衰の程度を示し、決定されるべき値である。複数の画素を通過するように描かれた白抜き矢印は波または粒子のビームの照射と検出素子の位置に対応している。矢印が指し示す先に記す数値は、検出装置の検出素子がその矢印の先に位置している際に得られる値（例えば減衰量）を意味しており、ここでは通った画素の値の合計が数値で示されている。つまり、この矢印が波または粒子のビームを表し、矢印が通る画素と矢印の向きで照射および検出（以下「照射」とのみ記す）を示している。矢印の先の合計値は、その矢印の先に検出装置の検出素子がある場合の、各検出素子で検出された減衰

成分に対応している。矢印の指し示す値つまり検出装置から得られる値のみによって $a_{11} \sim a_{22}$ の4つの値を特定することが、検出装置の検出素子の示す値に基づいて離散ラドン逆変換を実行することにより断層画像を再構成する処理に対応する。

[0017] 図1に示された例では、 $a_{11} \sim a_{22}$ のうち矢印それぞれがつないでいるものが線形和を与えるため、連立方程式に書き直せる。その連立方程式を解くと、

$$a_{11} = 4 - a_{21}$$

$$a_{12} = 3 + a_{21}$$

$$a_{21} = \text{任意}$$

$$a_{22} = 7 - a_{21}$$

が求まる解となる。つまり、元（決定すべき変数）の数が4であるのに対し、矢印の示す照射によって導き出せる連立方程式の実質的な数は3である。 a_{21} にどのような値を入れても上記連立方程式は成立してしまうことから、 $a_{11} \sim a_{22}$ の4つとも不定（indeterminate）となり値を特定できない。

[0018] 図2は、従来および本実施形態の離散ラドン逆変換の代数的手法の原理を説明する説明図である。図2Aは図1と同じもの、図2B、Cは別の従来の手法を例示するもの、そして図2Dが本実施形態の工夫を反映したものである。図2A～Dの解を表1にまとめている。

[表1]

	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}
図2A（図1）	$4 - a_{21}$	$3 + a_{21}$	任意	$7 - a_{21}$
図2B	$4 - a_{21}$	$9 - a_{21}$	任意	$1 + a_{21}$
図2C	$4 - a_{21}$	$9 - a_{21}$	任意	$7 - a_{21}$
図2D	1	6	3	4

[0019] 表1に示すように、図2A（図1）の場合と同様、図2B、Cでも $a_{11} \sim$

a_{22} の4つの値を特定しえない。つまり対角方向の照射を用いて変数の組み合わせを変更して連立方程式を作ったとしても、図2B、Cでは $a_{11} \sim a_{22}$ の4つの値が特定できるとは限らない。他方、図2Dの矢印で示すような照射をした場合、 $a_{11} \sim a_{22}$ の4つの値を一意に決定することができる。注目すべきは、図2Dの矢印の組み合わせが図2A～Cにある個別の矢印（すなわち照射方位と検出素子）を取捨選択して組み合わせたものであることである。図2Dでは、解くべき連立方程式の数を示す矢印の数が増えているわけでもない。それにも関わらず図2Dでは4つの値が特定される。このような違いは対称性の現われと本発明者は考えている。つまり、図2A～Cでは検出方向または検出素子について対称性が高いため解が不定となるのに対し、図2Dでは、対称性の破れ（symmetry breaking）が生じているため代数的に値が特定できている。この違いが示唆するのは、照射の段階で適切な工夫をすれば、現実の断層画像の再構築処理のためのより一般の形をもつ多元連立一次方程式でも代数的手法によって解を求められる余地があることである。本願の発明者は、照射の段階（離散ラドン変換）においてオーバーサンプリングを行いさらにデシメーションを組み合わせれば、対称性の破れを意図的に実現することができて代数的手法によって不定ではない厳密解が得られることに気づいた。

[0020] ここで、本実施形態における例示の幾何学的配置を説明する。図3は本実施形態の画像が取得される一例の断層撮像装置100において、画像が取得される対象物の切断面における平面配置を含む概略構成を説明するための模式図である。対象物（図3には示さない）に対し静止した空間の一平面にN画素×N画素を持つ画素の群が定義される。通例この整数Nは検出装置20の検出素子22の数と一致させている。このため、本実施形態において、整数Nを特に解像度Nと呼ぶこともある。波または粒子のビーム4は、その平面に含まれており、照射装置10から照射される。検出装置20と照射装置10は、相対配置が固定されたまま対象物に対して回転することができる。このような制御を含む装置の動作や計算処理のために、断層撮像装置100

はコンピュータ機器でありうる制御装置 150 を備えている。この回転は、上記画素の群やそこに静止している対象物に対する相対的なものである。このため必ずしも検出装置 20 と照射装置 10 のみが回転されとは限らず、検出装置 20 と照射装置 10 が設置床面（図示しない）に対し固定されていて対象物が、画素の群とともに回転される場合もある。

[0021] 照射装置 10 により波または粒子のビーム 4 を照射し検出装置 20 によりそのビーム 4 を対象物の反対側で検出する動作は、従来の手法では検出方向 θ のスキャン範囲を画素数 N によって分割した刻みで検出方向についてサンプリングされる。図 3 のようなビーム 4 が平行なものでは、検出方向 θ のスキャン範囲は例えば $0^\circ \sim 180^\circ$ とされ、従来の手法では検出装置 20 からの検出信号が $(180/N)^\circ$ の刻みでサンプリングされる。なお、本実施形態を含めて、断層撮像装置 100 の検出方向 θ の典型的なスキャン動作は、一定速度で増加または減少させる定速回転をしながら、検出装置 20 の値を取得するタイミングを電氣的に制御することによりサンプリングが行われる。ただし、本実施形態はこのようなものに限定されるものではない。

[0022] ビーム 4 は上記座標にて全ての画素範囲をカバーする広がりを持ち、各検出素子 22 に向かう部分はある幅 τ を持っている。当該検出素子 22 に対するビーム 4 についてのその画素のもつ寄与は、典型的にはビーム 4 のうち、検出素子 22 の一つに向かうものがもつ幅 τ と各画素（縦横それぞれ δ ）の重なりである。図 3 では一つの画素についてこの重なりの様子を模様で示している。 N 画素 $\times$ N 画素の全ての画素について、検出方向 θ 別、検出素子 22 の別に寄与が定まる。この寄与を数値として保持しているのがシステム行列 W である。システム行列 W を用いると、照射と画像再構成のうち、照射を表す離散ラドン変換は、行列の積により、

$$X' = W X \quad (1)$$

と表現される。ここで、システム行列 W は、総画素数に応じた空間についてのサンプリング点の並びを行方向に、検出方向の刻みと検出素子とに応じた照射および検出についてのサンプリング点の並びを列方向にとるのが通常で

ある。従来の手法を図3の画素数などの設定に適用した場合には、システム行列 W が行方向にも列方向にも $N \times N$ 個の要素を持つ正方行列となりその要素の総数は N^4 となる。これは、画素が N 画素 $\times N$ 画素、検出方向 θ のスキャン範囲が N サンプル、検出素子22の数 N 素子であるためである。なお、画質を高めるために N の値は時代とともに増大しており、典型例では 10^2 すなわち 10^3 程度とされ、従来のものでは 2000 程度が最大値であるが、本実施形態の場合にも N の値が得に限定されるものではない。 N が 10^3 程度のものではシステム行列は行方向列方向ともに 10^6 程度の規模、要素数は 10^{12} 程度となる。

[0023] 式(1)の X は各画素の位置での減衰(吸収、散乱も含む)を表す像である減衰像を列ベクトルとして表現したものである。実際の空間での減衰像は図3に示した N 画素 $\times N$ 画素の二次元画像であるが、システム行列 W との演算のために、行方向を総画素数 $N \times N$ になるようにベクトル化したものが X である。式(1)において減衰像 X にシステム行列 W が作用して得られる左辺の列ベクトル X' は、サイノグラムと呼ばれる像に対応している。システム行列 W にて列方向を検出方向のサンプリング点と検出素子の並びとしたことに対応して、列ベクトル X' も検出方向のサンプリング点と検出素子それぞれについて得られる検出強度を示している。なお、サイノグラムは検出素子の軸と検出方向刻みの軸との2次元に列ベクトル X' の要素を並べ替えたものである。以上のように、式(1)は照射と検出を表現したものである。図2に示した図では、列ベクトル X は $a_{11} \sim a_{22}$ の各値に、また列ベクトル X' は各矢印の先に付した値にそれぞれ対応し、システム行列 W は、各矢印と各画素の対応関係を反映するものといえる。

[0024] 断層画像の再構成とは、式(1)が実現していることを前提として、システム行列 W とサイノグラムの列ベクトル X' から列ベクトル X を算出し、列ベクトル X から減衰像を得る処理である。つまり断層画像の再構成は形式的に次式により表現される。

$$X = W^{-1} X' \quad (2)$$

ここで、 W^{-1} は W の逆行列であり、式(2)は式(1)の両辺に W^{-1} を作用させて左右辺を入れ替えたものである。実際には、正方行列である W が常に逆行列 W^{-1} をもつ(正則である)とは限らない。図2A～Cで $a_{11} \sim a_{22}$ の各値が定まらないのは、それらの照射と検出の仕方では W^{-1} が存在しないことに対応し、他方、図2Dで $a_{11} \sim a_{22}$ が決定できるのは W^{-1} が存在することに対応する。つまり、図2Dにて例示した対称性の破れを用いるという着想の実現可能性は、逆行列 W^{-1} が存在するような正方行列であるシステム行列 W を十分な確かさで決定できることの可能性と等価である。本実施形態では、逆行列 W^{-1} をもつシステム行列 W を確実に決定できる手法が提案され、さらにそのための照射、検出、および断層画像再構成のための十分に実用性のある具体的構成も提供される。なお上述した図3に基づく説明は平行ビームを照射するものであるが、本実施形態はファンビームやコーンビームといった平行ではないビームを利用するような照射装置10や検出装置20を採用する場合にも当業者には明らかなわずかな変更によって適用することができる。また、図3の画素数などの設定以外においても、本実施形態の手法を適用することができる。なお、式(1)、(2)を、数学的に等価な他の形式により表現することもでき、たとえば、システム行列 W のために、上述したものと異なり、総画素数に応じた空間についてのサンプリング点の並びを列方向に、検出方向の刻みと検出素子とに応じた照射および検出についてのサンプリング点の並びを行方向にとる。そしてそれに対応させて、式(1)の X を各画素の位置に応じて行ベクトルとして表現することもできる。その場合式(1)、(2)に相当する式は、それぞれの各辺に転置操作を施したものとなる。この転置操作では行列やベクトルの行と列を入れ替え、ベクトルに作用させる行列が左からではなく右から作用させる順序が変わるという表現上の影響がある。ベクトルが「列または行ベクトル」のように択一的に記載され、対応する行列の要素の並びが「列方向または行方向」のように択一的に記載されているときは、これらの組み合わせの選択は、それぞれの択一的記載における同順のものを組み合わせて選ぶこととする。この表現の

選択は本出願の本質に影響を与えないため、本願においては特に断りの無い場合には式（１）のようにサイノグラムをベクトル化した X 等を列ベクトルにより表現し、システム行列等の行列は左から作用させる表記にもとづいて説明する。

[0025] ２．具体的構成

本実施形態では、最終的に式（２）が成立するよう、逆行列 W^{-1} を持ちうる正則な正方行列であるシステム行列 W を確実に決定できる。なお、本実施形態での区別のため、正方行列のシステム行列 W を、特に正方システム行列と呼び W_{SQ} と記す。

[0026] ２－１．オーバーサンプリングとデシメーション

本実施形態で正則な正方システム行列 W_{SQ} が得られるのは、オーバーサンプリングとデシメーション（間引き処理）を行うためである。図４は、これらを含む本実施形態の断層撮像装置１００のうち制御装置１５０において実施される処理を概観するフローチャートであり、図５は当該フローチャートの処理にて各段階で得られる行列やベクトル、または画像についての変遷を模式的に示す説明図である。図６は行列についてのデシメーション処理を示すフローチャートであり、図６Ａは乱択アルゴリズムによるもの、図６Ｂはグラム・シュミットの直交化法を採用するものである。

[0027] ２－２．処理の概要

本実施形態において実行される処理を概観すると、まず装置の構成が決定される（図４、Ｓ１０２）。後の撮像で N 画素 $\times N$ 画素（ N は正の整数）の二次元画像を再構成する場合、検出装置２０の検出素子２２の数も N 個とされる。検出方向 θ についてのサンプリングは、従来の手法では、上述したように、例えば $0\sim 180^\circ$ のような必要な範囲において重複しない N 方向となるように、例えば $(180/N)^\circ$ 刻みでサンプリングが行われる。これに対し本実施形態の検出方向のサンプリングは、必要な範囲において重複しない $N+n$ 方向（ n は１以上の整数）でなされ、例えば $(180/(N+n))^\circ$ 刻みで行われる。この n は、装置構成の決定Ｓ１０２の段階で検出素

子の素子数（断層画像の一辺の画素数） N に応じて適宜に決定される。このように、 N 方向に代えて $N + n$ 方向で検出方向のサンプリングを行うことを、オーバーサンプリングと呼ぶ。また n を特にオーバーサンプリング量とも呼ぶ。

[0028] 対象物 2 から断層画像を取得して適切な再構成像を得るためには、オーバーサンプリングに合わせシステム行列を決定しなくてはならない。オーバーサンプリングの場合の $N + n$ 個の検出方向で図 3 に示した従来のシステム行列と同様の処理を行ってシステム行列を生成する（S 1 1 2）。ここで求まるシステム行列は、検出方向と検出素子それぞれに対応させて列方向に $N \times (N + n)$ 、断層画像の画素数に対応させて行方向に $N \times N$ だけの要素をもつ。この非正方の行列を本実施形態においてオーバーサンプル・システム行列と呼び W_{os} と記す。図 5 に、このオーバーサンプル・システム行列 W_{os} を模式的に示している（符号 2 1 2）。このオーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 はオーバーサンプル・システム行列格納部 5 0 に格納される。次の行列デシメーション処理 S 1 1 4 において、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 から行列の適切な位置（間引き順）にある $N \times n$ 個の行ベクトルの要素が除去され、正方システム行列 W_{sq} （図 5、符号 2 1 4）が生成される。この正方システム W_{sq} 2 1 4 は正方システム行列格納部 6 0 に格納される。その際には、間引き順を与える数列 $\{k\}$ （以下「間引き数列 $\{k\}$ 」と呼ぶ）も間引き数列格納部 3 0 に格納する。この間引き数列 $\{k\}$ が適切であれば、正方システム行列 W_{sq} は正則行列となる。正方システム行列 W_{sq} からは、離散ラドン逆変換行列算出ステップ S 1 1 6 にてその逆行列 W_{sq}^{-1} が算出され、離散ラドン逆変換行列格納部 4 0 に格納される。本実施形態では逆行列 W_{sq}^{-1} を離散ラドン逆変換行列とも呼ぶ。ここで逆行列 W_{sq}^{-1} を算出するための処理には、例えば余因子法や掃き出し法など任意の手法を採用することができる。

[0029] 一方、対象物からの断層画像を得るには、照射装置 1 0 と各検出素子 2 2 をもつ検出装置 2 0 との間に、対象物 2 を配置する（S 1 2 2、図 5）。オ

オーバーサンプリングでの照射および検出のために、照射装置 10 からのビーム 4 を照射しながら、 n を 1 以上の整数として重複しない $N + n$ 方向で検出が行われる (S 1 2 4)。典型的な実装形態では、このビーム 4 は連続して照射し続けていて、対象物 2 と照射装置 10 および検出装置 20 の向き (検出方向) はなめらかに動きつつ、検出装置 20 の検出素子 22 からの信号が電氣的にサンプリングされる。重複しない $N + n$ 方向での照射および検出の典型例は、 $(180 / (N + n))^{\circ}$ 刻みのタイミングでのサンプリングである。得られる信号は、必要に応じて機器の物理的特性について補正やスケールの換算などの処理と配列順序の整理などをすれば、サイノグラムを生成しうるデータに整理される (S 1 2 6)。整理したものは、検出方向と検出器の位置とに対応することにより検出方向についてオーバーサンプルしたものであるため、本実施形態ではこれをオーバーサンプル・サイノグラム (図 5、符号 2 2 6) と呼ぶ。このオーバーサンプル・サイノグラム 2 2 6 を得る処理が、照射および検出の処理であり、離散ラドン変換である。このオーバーサンプル・サイノグラム 2 2 6 からは、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 の列方向の並びに合わせるような順序で要素を並べ替えた列ベクトルを得ることができる (ベクトル化 S 1 2 8)。このベクトルを本実施形態では第 1 ベクトル 2 2 8 (図 5) と呼ぶ。第 1 ベクトル 2 2 8 は、オーバーサンプリング・サイノグラムの値を持つので $N \times (N + n)$ 要素を持つ。第 1 ベクトル 2 2 8 は、式 (1) と同様に、仮に断層画像が得られていて、それをベクトル化したもの ($N \times N$ 要素の列ベクトル) にオーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 を作用させたとしたならば得られることとなる列ベクトルといえる。第 1 ベクトルは X_{os}' と記す。なお、照射および検出 S 1 2 4 からベクトル化 S 1 2 8 までは、信号のアナログデジタル変換による量子化、デジタル信号の処理や、必要に応じて一時的にデータを保存して処理することもできる。また、オーバーサンプル・サイノグラムは、それを生成しうるデータが得られれば十分であり、必ずしもその表示を行う必要はなく、オーバーサンプル・サイノグラムといえる明示的なデータを経由す

る必要もない。オーバーサンプル・サイノグラムをベクトル化したものに相当する第1ベクトルが検出装置20からの検出信号に基づいて得られれば、照射および検出S124以降ベクトル化S128まで等価な任意の処理を行う任意の処理も本実施形態に含まれている。

[0030] 正方システム行列 W_{sq} を得たのと同じの間引き順に従って、第1ベクトルを $X_{os'}$ の要素を間引くベクトルデシメーション処理(S130)を行えば、正方システム行列 W_{sq} との間で式(1)の関係を満たすことができる $N \times N$ 要素をもつ列ベクトルである第2ベクトル230を得ることができる。第2ベクトルは X' とも記す。第2ベクトル X' は正方システム行列 W_{sq} との間で式(1)の関係を満たすため、正方システム行列 W_{sq} の逆行列である離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} を用いて式(2)の関係が成り立ち、離散ラドン逆変換処理S132によって再構成像を与える第3ベクトル232が得られる。この第3ベクトル232は X とも記す。この第3ベクトル X の並びをベクトル化の逆操作によって N 画素 $\times N$ 画素の画像に戻すデベクタライズ処理により再構成像を画像化することができる(S134)。これで1スライス分の断層画像が再構築されるので、必要に応じてスライス位置を変更した処理を実行することができる。

[0031] 本実施形態の処理は図4、5においてAとBに示す2系統に分かれている。通常再構成像を撮像するユーザーは、照射および検出ステップS124～画像化ステップS134に至る処理の系統Bを実行する。つまりユーザーは、装置構成の決定S102、システム行列生成ステップS112～離散ラドン逆変換行列算出ステップS116に至る処理の系統Aを必ずしも実行する必要はない。システム行列生成ステップS112～離散ラドン逆変換行列算出ステップS116に至る処理の系統Aが必要となるのは、断層撮像装置を作製したり、設置やメンテナンスしたりする場面で、いわば機器メーカーが対応するような処理である。予め決められたオーバーサンプリング量 n に応じて間引き数列 $\{k\}$ および離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} が得られていれば、再構成像を撮像しようとするユーザーは自らの測定のためにはそれらを利

用するだけでよい。系統Aからの適切な機器情報についてのデータが得られていれば、それを使用すれば系統Bの範囲の処理は十分実行できる。

[0032] 特筆すべきは、系統Bのうち離散ラドン変換S 1 2 6～画像化ステップS 1 3 4が行列やベクトルの順序の入れ替えや行列積の演算であり、例えば逐次近似といった計算処理量が問題となる処理がその範囲に含まれていないことである。本実施形態において、ユーザーの通常の撮像において利用される系統Bの処理は、系統Aの処理により準備された間引き数列格納部30、離散ラドン逆変換行列格納部40を使うだけで十分に軽い計算負担で実行可能であり、この点は、本実施形態に高い実用性をもたらすものといえる。断層画像を取得するという最も頻度の高い処理の計算負担がごく少ないためである。特に、三次元ボリューム像を得るために多数のスライスの撮像を繰り返す用途には本実施形態の手法が極めて有利である。その繰り返しに系統Aの処理が不要なことに加え、系統Bの離散ラドン変換S 1 2 6～画像化ステップS 1 3 4はGPGPU (General-purpose computing on graphics processing unit) などのメニーコアタイプのプロセッサでの計算処理に適するため、今後の処理速度の向上も期待できるからである。

[0033] また、幾何学的な側面を反映するオーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2や正方システム行列 W_{sq} 、システム行列 W_{sq} の逆行列 W_{sq}^{-1} がシステム行列生成ステップS 1 1 2～離散ラドン逆変換行列算出ステップS 1 1 6に至る処理の系統Aのみに含まれており、測定のための系統B (図4) と分離されていることから、代数的手法に反復を利用したときの収束の問題と測定のためのノイズの側面とが本質的に分離されている。このため、本実施形態では、ノイズとは無関係な近似解に起因した現象が生じにくく、画像処理で一般に採用される各種のノイズ軽減処理が目的通りに効果を発揮しやすいという利点もある。

[0034] 2-3. 正則な正方システム行列を与える間引き順の決定

概要において上述したように、離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} が正方システム行列 W_{sq} の逆行列として求まることは、間引き数列 $\{k\}$ の適切さに依存

している。その間引き数列 $\{k\}$ は、行列デシメーション処理 S 1 1 4 において決定されている。本実施形態の行列デシメーション処理 S 1 1 4 は、結果として正則な正方システム行列を与えられれば限定はされず、その具体例として次の二つの手法が挙げられる。

[0035] 2-3-1. 階数での判定を利用する乱択アルゴリズム

図 6 A は、乱数またはランダムな選択を利用する乱択アルゴリズム (randomized algorithm) での行列デシメーション処理の一例を示すフローチャートである。オーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 の行の総数は $N \times (N + n)$ である (図 5)。このうち、行列を正方行列にするために残す行数は $N \times N$ であり、間引く行の総数は $N \times n$ である。行を特定するインデックス (行番号) の整数の範囲 $[1, N \times (N + n)]$ のうちから、残す $N \times N$ 個か間引く $N \times n$ 個かいずれかの数列を決定する。この決定のために図 6 A では乱択手法を採用する。つまり、残す $N \times N$ 個か間引く $N \times n$ 個かのいずれかを数値生成された乱数でランダムに決定すれば、最終的に間引き数列 $\{k\}$ が決定できる (S 1 1 4-2)。間引き数列 $\{k\}$ が決まれば、対応した間引き処理によってオーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 から正方システム行列 W_{sq} を得ることができる (S 1 1 4-4)。次に、求めた正方システム行列 W_{sq} の階数 (rank) を算出する (S 1 1 4-6)。算出した階数は、正方システム行列 W_{sq} が正則であれば $N \times N$ と同じ値であり、そうでなければ $N \times N$ よりも小さい値となる。このため、階数の値は正方システム行列 W_{sq} が逆行列を持ちうるかどうかの判定となる。その判定で階数が $N \times N$ と一致した場合には (S 1 1 4-8、Y の分枝) その時点での正方システム行列 W_{sq} を与える数列 $\{k\}$ をそのまま間引き数列 $\{k\}$ として間引き数列格納部 3 0 に出力し、正方システム行列 W_{sq} 2 1 4 を正方システム行列格納部 6 0 に出力する (S 1 1 4-10)。これにより行列デシメーションの処理を終える。階数が $N \times N$ と一致しなければ (S 1 1 4-8、N の分枝)、再び S 1 1 4-2 から別の乱数に基づいてランダムアルゴリズムによって間引き数列 $\{k\}$ の選択から再度実行する (リトライ処理)。このような乱択

アルゴリズムを採用すれば、実用的な速度で行列デシメーション処理 S 1 1 4 を実行することができる。なお、後述するように、ランダムに選んだ場合に正則な正方システム行列 W_{sq} が得られる確率は解像度 N の値とオーバーサンプリング量 n の値の選択の影響をうける。解像度 N が 1 0 0 0 程度の値の場合、 n はその 1 ~ 2 % 程度である 1 0 ~ 2 0 としても、十分に高い確率で正則な正方システム行列 W_{sq} を得ることができる。

[0036] 2-3-2. グラム・シュミットの直交化法

図 6 B は、グラム・シュミットの直交化を用いる行列デシメーション処理の一例を示すフローチャートである。グラム・シュミットの直交化法を採用する場合、まずオーバーサンプル・システム行列 W_{os} の対角化処理を行う（S 1 1 4 - 1 2）。それに伴い間引き数列 $\{k\}$ が決定される。この対角化は、例えば QR 分解法により行うことができる。また、対角化の処理により、対応する第 1 ベクトル 2 2 8 の各成分も変換（混合）する必要がある。このため、決定される間引き数列 $\{k\}$ とともに、この変換を規定する行列データも決定する。対角化の後にグラム・シュミットの直交化法（S 1 1 4 - 1 4）を実行すれば、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 から線形独立な $N \times N$ 個の行ベクトルの群を決定することができる。この行ベクトルの群を並べれば、正方システム行列 W_{sq} となる。その際採用されなかった行のインデックスを示す間引き数列 $\{k\}$ 、正方システム行列 W_{sq} 、および対角化による成分を混合する変換行列を出力する（S 1 1 4 - 1 6）。なお、当該変換行列は、ベクトルデシメーション処理 S 1 3 0 にて第 1 ベクトル 2 2 8 を変換するために利用される。

[0037] 2-4. 逆行列を持つ比率（解の存在比）の確認

次に、数値シミュレーションにより調査した正方システム行列 W_{sq} が逆行列をもつ成功率を説明する。表 2 は、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2 を準備し、それぞれを図 6 A の乱択アルゴリズムに従う行列デシメーションの処理を 2 0 回行うことにより正方システム行列 W_{sq} を求めてその階数を決定したときに $N \times N$ となった割合（解の存在比）をまとめたものであ

る。解の存在比が N およびオーバーサンプル量 n にどのように依存するかを調査するため、ここでは $N = 32, 30, 28$ 、オーバーサンプル量 $n = 0 \sim 10$ の各組み合わせを網羅して調べた。

[表2]

n	$N = 32$	$N = 30$	$N = 28$
0	0. 0	0. 0	0. 0
1	0. 7	0. 5	0. 6
2	0. 0	1. 0	0. 0
3	1. 0	1. 0	1. 0
4	1. 0	0. 0	1. 0
5	1. 0	1. 0	1. 0
6	1. 0	1. 0	1. 0
7	1. 0	1. 0	1. 0
8	1. 0	0. 0	1. 0
9	1. 0	1. 0	1. 0
10	0. 05	1. 0	1. 0

[0038] 表2に示した解の存在比の値は、同じ N および n を採用したときの現実のオーバーサンプル・システム行列 W_{os} 2 1 2を対象にして図6Aの乱択アルゴリズムを実行する場面において、正方システム行列 W_{sq} の階数が $N \times N$ となる成功率に対する指標となる。表2に示したように、概してオーバーサンプル量 n を増やせば解の存在比は高くなり、実際に n が3程度まででその値が急激に高まることがわかる。しかし個別に n の値に対する傾向をみると、解の存在比は n に対し単調増加はしてはいない。例えばいくつかの偶数（ $n = 2, 4, 8, 10$ ）では、解の存在比が0または極小さな値となっているものがある。この理由については現時点で定かではないが、 N が偶数の場合に n も偶数であれば対称性が高まってしまうことに起因していると予測して

いる。なお、ここでは実際に採用される N の場合に比べて、小規模なシステム行列を利用した確認にとどまるが、例えば $N = 128$ とした実例でも解の存在比は十分に高く（後述）、さらに $N = 1000$ 程度にした場合にも同様の傾向が実現するものと予測している。その際にどの程度のオーバーサンプリング量 n が適切であるかまでは特定できていないが、表2の N を変更することでオーバーサンプリング量 n への依存性が影響を受ける。このため、オーバーサンプリング量 n だけではなく必要に応じて解像度 N を調整することも有用である。なお解像度 N は、例えば検出装置においていずれか一方または両方の端に位置する検出素子を意図的に利用せず、対応させて断層画像の周縁の画素を使用しないといったことにより、容易に減じることができる。

[0039] 2-5. ブロックによるデシメーション

本実施形態にて正則な正方システム行列 W_{sq} が得られるデシメーション（間引き処理）は別の手法によって実施することもできる。本発明者は、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} を対象に、検出方向を単位としてまとまったブロックでの間引き処理によっても、正則な正方システム行列 W_{sq} が得られることを確認している。

[0040] 図7は、解像度 N を8、オーバーサンプリング量 n を1とした例において、ブロックによるデシメーション処理を示す説明図であり、図7Aは、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} を画像により示しており、数値0を白、数値1を黒、それら中間値は、対応する明度のグレーにより表現している。この数値は、図3に示したように、ビーム幅 τ と画素の幅 δ と幾何学配置によって決まる。図7Bは、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} から、ブロックによるデシメーション処理によって得た正方システム行列 W_{sq} を同様に示したものである。

[0041] 各ビームに対する各画素の位置における吸収の寄与を表すオーバーサンプル・システム行列 W_{os} は、解像度 N が8、オーバーサンプリング量 n が1の場合、72行×64列となる。これは、図3において、解像度 N は8×8個の画素を持つこと、および、検出装置20が8個の検出素子22を持つことに

対応する。ここで、説明のため、 θ の原点を画素の並びの水平方向（紙面上の左右方向）または垂直方向（同、上下方向）のいずれか一方に揃っている方向に選ぶこととする。本節では一例として、紙面における12時方向にビーム4が向かう検出方向を θ の原点（ $=0^\circ$ ）とする。この場合、図7Aのオーバーサンプル・システム行列 W_{os} の第1～8行の部分行列は、検出方向 θ を 0° とした場合の各検出素子22へ各画素が与える寄与を数値化したものである。オーバーサンプル・システム行列 W_{os} の第9～16行の部分行列は、検出方向 θ を 20° とした場合の各検出素子22への各画素の寄与である。同様に、第19～24行、第25～32行、…、第65～72行の部分行列は、順に、 40° 、 60° 、…、 160° の検出方向とした場合の同様のものである。このように、図7Aは、計9方向の各検出方向についての寄与を表すオーバーサンプル・システム行列 W_{os} である。

[0042] オーバーサンプル・システム行列 W_{os} の各要素について詳述する。オーバーサンプル・システム行列 W_{os} の第1～8行の部分行列は、検出装置20の検出方向が原点（ $\theta=0^\circ$ ）にあるときに8個備わる検出素子22それぞれに対する 8×8 個の画素の各画素の寄与である。またオーバーサンプル・システム行列 W_{os} の第1～64列の要素は、 8×8 個の各画素の寄与を、画素の第1行の8画素について第1列～第8列に、画素の第2行の8画素について画素の第2列～第16列に、…、画素の第8行の8画素について画素の第57列～第64列に、と順に並べたものである。

[0043] オーバーサンプル・システム行列 W_{os} の第9～16行の部分行列は、 θ が原点の次のサンプリングの検出方向（ $=20^\circ$ ）となる検出方向に向けられた場合についての各画素の寄与の数値である。この数値も、その検出方向で各画素が各検出素子22に与える寄与である。第17行の部分行列について以下同様である。一般の検出方向 θ の場合には、各画素の寄与が中間的な値を持ちうる。例えば、1画素の面積 δ^2 のうちどれだけの面積を幅 τ の各ビームが通過するか、という幾何学配置によって決まる。

[0044] 本実施形態のブロックによるデシメーション処理は、図7の例に即して説

明すれば、例えば、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} の第65～72の部分行列を除去して、64行64列の正方行列とすることである。これは、間引き数列 $\{k\}$ を65から始まる8個の要素を持つ数列、つまり、65、66、…、72とすることと同等である。より一般には、デシメーション処理でオーバーサンプル・システム行列 W_{os} から除去するオーバーサンプル量 $n \times$ 解像度 N 個の要素はまとまったブロックの連続する範囲とすることができる。さらにその連続する範囲は、1、 $N+1$ 、 $2 \times N+1$ 、…、 $N \times N+1$ 、すなわち、 s を1以上の整数として、 $(s-1) \times N+1$ から始まるものとすることができる。デシメーション処理は、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} に残す $N \times N$ 個の要素を決定することにより、残りの $n \times N$ 個の要素を間接的に特定することによっても実行可能である。その際に残す $N \times N$ 個の要素は、 s を1以上の整数として、 $s \times N$ で終る連続する範囲のものとする。この場合、オーバーサンプル量 n が2以上の場合にオーバーサンプル・システム行列 W_{os} から除去される行の範囲のブロックは、第1行を含む一つのブロックと第 $(N+n) \times N$ 行（最終行）を含むもう一つのブロックとに分かれて2ブロックとなることがある。いずれにしても、除去される行の範囲のブロックとなる部分行列は、連続した範囲であるだけでなく、検出方向を単位にしたものである。

[0045] デシメーション処理で連続する範囲を除去したり残したりする処理では、かならずしも正方システム行列 W_{sq} が正則になるとは限らない。正方システム行列 W_{sq} が正則になれば同処理は一度で十分であるが、正則とならないときには条件を変更して正則となるまで同処理は再度実行される。条件の変更は例えば整数 s の値を変更する。

[0046] 図8は、本実施形態におけるブロックによるデシメーション処理の成果を示す説明図であり、図8Aは、図7Bの正方システム行列 W_{sq} から算出した逆行列である離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} であり、図8Bは、離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} を正方システム行列 W_{sq} に左から作用させて得られる行列を示す。図7Bの正方システム行列 W_{sq} が実際に、離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1}

¹を逆行列としてもつことは、図8Bに示されている行列が単位行列であることに表れている。

[0047] 本発明者は、解像度 $N = 8$ 、オーバーサンプル量 1 の場合以外にも、 $N = 2$ および $N = 64$ それぞれでオーバーサンプル量 1 の場合に、最後の検出方向に対応する連続する範囲のブロックによるデシメーション処理によって正則な正方システム行列 $W_{s,q}$ が得られることを確認した。

[0048] 連続する範囲によるブロックでのデシメーション処理であっても、図4、5に基づく説明は同様に成立する。特に図5からも分かるように、間引き数列 $\{k\}$ が連続する範囲を除去するものや、連続する範囲を残すものである場合、本実施形態では、除去される範囲または残す範囲に対応している検出方向が特定できる。例えば、図7では、オーバーサンプル・システム行列 $W_{s,q}$ の第65～72行を除去しており、 160° の検出方向に対応する要素が除去されている。これに応じて、検出動作で 160° の検出方向において取得した測定値も間引き数列 $\{k\}$ に応じて除去される。つまり、本実施形態においてブロックによるデシメーション処理を行う場合、間引き数列 $\{k\}$ にて除去する範囲を特定する $n \times N$ 個の要素に対応する検出方向について検出動作自体が省略可能である。結果として、検出動作では、オーバーサンプリングによる $(N + n)$ 方向の検出方向のうち、 n 方向は省略できるため、最小限の検出方向は、 N 方向となり、その場合にはデシメーション処理が実質不要となる。

[0049] 2-6. 具体的構成のまとめ

以上を示した通り、本実施形態にて用いるオーバーサンプリングとデシメーション（間引き）を組み合わせる処理は、断層画像の撮像および取得のプロセスに高い実用性をもたらすものである。またその利点の一つとして、間引き数列 $\{k\}$ を決定する処理はユーザーが断層画像を取得する処理とは別個に行うことができるため、逐次近似の処理、といったが計算量の多い処理は繰り返す必要もない。

[0050] 3. 本実装形態の実装

本実施形態は、断層撮像装置として実装することも、また既存の断層撮像装置のための、制御および処理ソフトウェアとして実装することもできる。

[0051] 3-1. 断層撮像装置での実装

本実施形態の断層撮像装置100は、上述した処理を主に制御装置150において行うことにより、従来の断層撮像装置において、従来のARTを用いたものと同様またはそれ以上に良質な画像の断層画像を得ることができる。その際に必要となる計算資源も十分に実用的なものであり、また処理が高速である。

[0052] 図9は、断層撮像装置によって本実施形態を実装する場合における制御装置150のいくつかの特有の機能部と特有のデータ格納部を示すブロック図である。システム行列生成部162、行列デシメーション処理部164、および逆行列算出部166は、それぞれ、システム行列生成ステップS112、行列デシメーション処理S114、および離散ラドン逆変換行列算出ステップS116を実行する。同様に、動作制御部174、離散ラドン変換処理部176、ベクトル化処理部178、ベクトルデシメーション処理部180、離散ラドン逆変換処理部182、および画像データ生成部184は、照射および検出ステップS124、離散ラドン変換S126、ベクトル化S128、ベクトルデシメーション処理S130、離散ラドン逆変換処理S132、および画像化ステップS134をそれぞれ実行する。その動作に当たり、間引き数列格納部30、離散ラドン逆変換行列格納部40、オーバーサンプル・システム行列格納部50、および正方システム行列格納部60も利用される。また、照射および検出S124からベクトル化S128までが等価な処理で実施できることと同様に、照射および検出ステップS124、離散ラドン変換S126、ベクトル化S128は、機能上これらを組み合わせた処理を行いうる機能部により実施することができる。さらに、制御装置150は、システムAの処理とシステムBの処理で必要となる機能部が明瞭に分かれていることから、必要に応じシステムAの処理を主として行うものであったり、逆にシステムBの処理を主として行うものであったり、様々な実装形態をとることができる。

きる。断層撮像装置の具体例としては、X線CTスキャナー、SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)、光トモグラフィー(Optical Tomography)、光学CT装置が挙げられる。

[0053] 3-2. コンピュータプログラムでの実装

また、断層撮像装置100は、例えば従来のARTを実行するために用いられる照射装置10検出装置20を備えている断層撮像装置において、例えばコンピュータプログラムの実装形態として、断層撮像装置100に備わる制御装置150に、図4に示したフローチャートの一部または全部の制御ステップや変換、算出等の計算処理を実行させることによって、その全体を断層撮像装置100として実施することができる。本実施形態では、さらに、ユーザーが断層画像を撮像するタイミングでは、断層撮像装置100に備わる制御装置150には系統B(図4)の処理のみを実行させることもできる。

[0054] 4. 計算機シミュレーションによる検証(実施例)

本実施形態による再構成手法の有効性を計算機シミュレーションにより確認した。逆ラドン変換を含む処理全般は、対比のための従来の手法のものも含めて、数式処理ソフトウェアMathematica(Wolfram Research, Inc., Champaign, Illinois)および画像処理ソフトウェアImageJ(アメリカ国立衛生研究所)を用いて実現した。本実施形態の制御装置150の処理も含め、シミュレーション処理のために、Intel社製Xeon E5プロセッサ(3.5GHz、6-Coreタイプ)のCPUと64GBの主記憶装置とを搭載したコンピュータを採用した。図10は、検証のために用いた検証用データ(数値ファントム)を示す図(図10A、原画像という)および対応するオーバーサンプル・サイノグラム(図10B)である。各図には背景と区別するための外形を縁取る実線を画像の周辺に追加し、画素の座標を表す画素番号の最初および最後を示す数値を上辺および左辺に示している。原画像(数値ファントム)は、計算機シミュレーションにおいて対象物のある断面における減弱率構造を模擬するために人為的に与える数値データで

あり、画素が空間位置に対応した $N = 128$ つまり 128×128 の画像として表現できる。図10Aでは吸収の強い領域を暗く、弱い領域を明るく表示している。計算機シミュレーションでは、断層撮像装置100による照射および検出S124の動作も模擬し、計算によって測定値に相当する数値データを得た。これを表すオーバーサンプル・サイノグラムでは、検出強度の弱い値を暗く、強い値を明るく表示している。図10Bのオーバーサンプル・サイノグラムは、測定動作にあたる離散ラドン変換S126（図4）に基づき得られたものである。具体的には、 $N = 128$ として128個の検出素子22を持つ検出装置20によって、 $n = 1$ を採用して129（ $= N + n$ ）方向からの投影分にてオーバーサンプリング離散ラドン変換を実行している。これを反映するため、図10Bのオーバーサンプル・サイノグラムは 128×129 画素のサイズをもつ画像として表示している。図10Bのオーバーサンプル・サイノグラムは本実施形態の動作のためのものであるが、従来のFBP法やML-EM法の処理のためにも利用している。従来の手法ではオーバーサンプリングすることは特段必要ではなくN方向（128方向）で取得したサイノグラム（図示しない）を採用することもできるが、ここでは、より直接的な比較とするために本実施形態および従来のもものために（ $N + n$ ）方向からのオーバーサンプル・サイノグラムを採用している。

[0055] 本実施形態の検証として、図5および図6に示した処理を実施して再構成画像を取得した。行列デシメーション処理S114の間引き数列 $\{k\}$ を決定するために採用した処理は図6Aに示した乱択アルゴリズムである。当該アルゴリズムに基づき間引き数列 $\{k\}$ を決定する処理を実際に多数回行ったところ、階数の判定処理S114-8で階数が $N \times N$ （ 128×128 ）に一致せず（達せず）Nの分岐のとおり、乱数による決定S114-2に戻ってリトライ処理が必要となることがあった。解の存在比を反映して実際に必要となったリトライ処理の割合は、20回のアルゴリズム動作に対し3～4回程度にとどまり、残りの16～17回は乱数による決定S114-2を一度実行すれば十分であった。

[0056] 図 1 1 に示す再構成画像は、本実施形態により求めたもの（図 1 1 A）、従来の F B P 法において H a n n フィルターを用いたもの（図 1 1 B）、および従来の代数再構成法として逐次近似計算（M L - E M 法）を 3 0 回行って得たもの（図 1 1 C）である。本実施形態での再構成画像は 1 2 8 × 1 2 8 画素の範囲で得られるものの、これらの再構成画像は 9 1 × 9 1 画素の範囲のみ示している。これは、F B P 法でシミュレーションにより再構成像が得られる範囲が 1 2 8 画素を直径とする円形の領域となり、その円に概ね内接する正方形領域が比較可能となるためである。

[0057] 図 1 0 A と図 1 1 A を比較すれば明らかなように、本実施形態においては再現性が極めて高い再構成画像が得られた。このような高い再現性は、リトライ処理の有無にかかわらず乱択アルゴリズムにより得られたどの間引き数列 {k} を採用した場合でも同様であった。これは、従来の H a n n フィルターを用いた F B P 法（図 1 1 B）、および M L - E M 法（図 1 1 C）とは異なり、離散ラドン逆変換行列 W_{SQ}^{-1} が代数的な厳密解となることに裏付けられている本実施形態の利点であり、それが画像自体の高い再現性を通じ確認されている。

[0058] 次に、再構成像の再現性の比較を数値的指標に基づいて実施した。具体的には、各再構成画像の再現性について式（3）の I S N R （Improvement in Signal-to-Noise ratio）を用いて評価した。

[数1]

$$ISNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\|\tilde{x} - x\|^2}{\|\hat{x} - x\|^2} \right) \quad (3)$$

ここで、

[数2]

$$x, \hat{x}, \tilde{x}$$

は、順に、図 10 A に示す原画像、対象とする図 11 A～C のいずれかの再構成画像、および単純な逆ラドン変換（フィルター無しの逆投影）の再構成画像について、それぞれをベクトル表示したものである。単純な逆ラドン変換の再構成画像は、比較のための基準であり、その画像を図 11 D に示す。式（3）の評価値は図 11 に示した 91×91 画素の範囲を対象とした。単純な逆ラドン変換の再構成画像を基準に求めた図 11 A～C のいずれかの再構成画像の I N S R の値を表 3 に示す。

[表3]

	本実施形態 (図 9 A)	FBP+Hann フィルタ (図 9 B)	ML-EM (図 9 C)
ISNR[dB]	221.001	42.1208	52.9420

各 I S N R の値から、F B P 法や逐次近似再構成法を用いる従来例に比べ、本実施形態による再構成画像の再現性が大幅に高まっていることが数値的にも確認された。

[0059] 5. 画像再構成手法のバリエーション 上述した画像再構成手法では、オーバーサンプル・システム行列 W_{os} から得た正方システム行列 W_{sq} が正則であって逆行列をもつことが保証された下で、正則な正方システム行列 W_{sq} から逆行列 W_{sq}^{-1} を実際に算出して画像再構成を実施した。本開示では、追加の画像再構成手法として、同様の正則な正方システム行列 W_{sq} の擬似逆行列を利用して画像再構成を行いうる。

[0060] 本追加の画像再構成手法のための擬似逆行列は、例えば特異値分解 (singular value decomposition; SVD) の手法によって算出される。例えば、ムーア・ペンローズ (Moore-Penrose) 型逆行列は正方行列に対して特異値分解により生成可能であり、本追加の画像再構成手法のための擬似逆行列として有用なものの一例である。

[0061] 本開示の実施形態では、上述した画像再構成手法および本追加の画像再構成手法の双方で、式（１）に相当する式（４）が利用される。

$$X' = W_{SQ} X \quad (4)$$

この際、正方システム行列 W_{SQ} は正則であることすなわち逆行列をもつことが保証されている。上述した画像再構成手法は、この正則な正方システム行列 W_{SQ} の逆行列である離散ラドン逆変換行列 W_{SQ}^{-1} を求めて式（５）に従って画像再構成を実施するものであった。

$$X = W_{SQ}^{-1} X' \quad (5)$$

[0062] 本追加の画像再構成手法では、式（４）までは同等であるものの、式（５）に代えて、

$$X = W_p^{-1} X' \quad (6)$$

に従って画像再構成を実施する。ここで、 W_p^{-1} は正方システム行列 W_{SQ} の擬似逆行列である。つまり、正則であって逆行列の存在が保証されている正方システム行列 W_{SQ} の逆行列を敢えて使わず、近似的な逆行列である擬似逆行列 W_p^{-1} を利用しても、本追加の画像再構成手法では、画像再構成を行いうる。以下、X線CTのデータによる再構成処理を行った事例（図１２、図１３）および中性子線CTのデータによる再構成処理を行った事例（図１４、図１５）を説明する。

[0063] 図１２は、マウス標本を利用して実際に取得したX線CTのデータによる再構成処理を行った事例を説明する説明図であり、図１２Aはマウス標本の写真、図１２Bは擬似逆行列 W_p^{-1} を利用した再構成画像、図１２Cは比較のためのFBPによる再構成画像、図１２Dは比較のためのML-EMによる再構成画像、図１２Eは比較のための単純な逆ラドン変換による再構成画像である。図１２Aの標本は、X線CT装置（SCANXMATE-E090S、コムスキャンテクノ株式会社、横浜）により撮影した。撮影データは、本来の性能とは異なり、比較計算のために適する少ない画素数（ 256×130 ）で取得し、再構成時に 64×64 、すなわち $N = 64$ になるように粗視化した。

[0064] 本追加の画像再構成手法の図１２Bのための処理を、必要に応じて図４の

要素を付記しながら説明すると、最初に、 $180^\circ / 65$ すなわち 2.769° ステップで65方向の検出方向についてオーバーサンプル・システム行列 W_{os} を算出した後（図4、S112）、最初の方角を 0° として65番目の 177.230° の検出方向に対応する連続する範囲の要素をブロックで間引くことにより行列デシメーション処理をして、64方向に対応する連続する範囲の要素を持つ正方システム行列 W_{sq} を決定した（S114）。これにより、間引き数列 $\{k\}$ が決定される。この正方システム行列 W_{sq} が正則であることは、階数が $4096 (= 64 \times 64)$ であることにより確認した。さらに、当該正方システム行列 W_{sq} のムーア・ペンローズ型逆行列を算出して擬似逆行列 W_p^{-1} を算出して、それを離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} とした。このため、図4において、離散ラドン逆変換行列算出ステップS116では、擬似逆行列が算出され、離散ラドン逆変換行列格納部40（図4、図5）にはその擬似逆行列が格納される。

[0065] 次に、マウス標本を対象に上記65検出方向に対応するデータとして、 $360^\circ / 130$ すなわち 2.769° ステップで130方向からデータを取得した。このとき、検出器の数は256である。ここで得られた 256×130 のサイノグラム画像に対して、 180° 分に対応する1から65行目までを残すようにトリミングし、検出器方向の256ピクセルに対しては、25%画像サイズ縮小を行っている（S122、S124）。本実施例は、このような処理を行ったデータに対しても、本手法が有効であることを示している。オーバーサンプル・サイノグラムに対応する第1ベクトル X_{os}' を生成した（S126、S128）。次に、間引き数列 $\{k\}$ に基づいて65方向65番目に当たる 177.230° の検出方向の成分を間引くことにより、ベクトルデシメーション処理（S130）を実行して第2ベクトル X' を求めた。擬似逆行列 W_p^{-1} を離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} のために用いることにより、第3ベクトル X を算出し（S132）、さらにデベクタライズ処理により再構成画像を得た（S134）。擬似逆行列 W_p^{-1} の算出は、後述するトレランスを $1/19$ に設定して実施した。

- [0066] 図12C～図12Eのためには、 $180^\circ / 64$ すなわち 2.8125° ステップで64方向の検出方向から取得したデータを対象にして、そのサイノグラム画像を図12B場合と同様のサイズとなるようリサイズしたデータを使用した。図12C～図12EはImageJ(米国アメリカ国立衛生研究所)を利用し、図12CはFBP処理、図12DはML-EM処理(イタレーション数1)、図12EはBP処理により、それぞれの再構成画像を得た。なお、ML-EM処理でのイタレーション数と画質との関係は事前に調査し、1回が最も良好となることを確認している。
- [0067] 図12B～図12Eから明らかなように、擬似逆行列 W_p^{-1} を利用する追加の画像再構成手法ではFBP、ML-EM、BPとの比較で良好な品質での再構成像を得ることができることを確認した。
- [0068] 擬似逆行列 W_p^{-1} の算出は、典型的には適切なトレランス値を設定して行われる。トレランス値は、特異値分解の近似を通じて擬似逆行列を生成する処理において、特異値数列において特異値を除外するための基準値を、特異値の最大値との比率で示す。例えば、 $1/5$ をトレランス値とした場合には、特異値の最大値の $1/5$ より小さい値を持つ特異値を0で置き換えて、特異値分解した行列から擬似逆行列を算出する。図13は、トレランスを変更して算出した擬似逆行列 W_p^{-1} により生成した再構成画像を含んでおり、図13A～図13Jは各図に付す値にトレランス値を設定したものである。また、図13Kは、特異値を大きさ順に並べたグラフであり、縦軸に特異値の値、横軸に順序としてプロットしている。グラフには、複数のトレランス値を示す複数の直線を付記している。図13から分かるように、トレランスを $1/1$ とすると再構成画像は認識できる像を構成しない。トレランスを小さくするにつれて再構成画像は解像度を増してゆくが、 $1/13$ 以降は比較的安定している。
- [0069] 図14は、コンクリート標本(直径25mm×高さ60mm、70g)を利用して実際に取得した中性子線CTのデータによる再構成処理を行った事例を説明する説明図であり、図14Aはコンクリート標本の写真、図14B

は擬似逆行列 W_p^{-1} を利用した再構成画像、図14Cは比較のためのFBPによる再構成画像、図14Dは比較のためのML-EMによる再構成画像、図14Eは比較のための単純な逆ラドン変換による再構成画像である。図14Aの標本は、小型中性子線源加速器によるCT撮像装置（RIKEN Accelerator-driven Neutron Source、理研中性子ビーム技術開発チーム、理化学研究所、和光）により撮影した。撮影データは 360° を 3° おきに120ステップで取得し、再構成時に 64×64 、すなわち $N = 64$ になるように粗視化した。

[0070] 本追加の画像再構成手法の図14Bのための処理を、必要に応じて図4の要素を付記しながら説明すると、最初に、 $180^\circ / 65$ すなわち 2.769° ステップで65方向の検出方向についてオーバーサンプル・システム行列 W_{os} を算出した後（図4、S112）、最初の方角を 0° として65番目の 177.230° の検出方向に対応する連続する範囲の要素をブロックで間引くことにより行列デシメーション処理をして、64方向に対応する連続する範囲の要素を持つ正方システム行列 W_{sq} を決定した（S114）。これにより、間引き数列 $\{k\}$ が決定される。この正方システム行列 W_{sq} が正則であることは、階数が $4096 (= 64 \times 64)$ であることにより確認した。さらに、当該正方システム行列 W_{sq} のムーア・ペンローズ型逆行列を算出して擬似逆行列 W_p^{-1} を算出して、それを離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} とした。このため、図4において、離散ラドン逆変換行列算出ステップS116では、擬似逆行列が算出され、離散ラドン逆変換行列格納部40（図4、図5）にはその擬似逆行列が格納される。

[0071] 次に、コンクリート標本を対象に上記65検出方向に対応するデータとして、 $360^\circ / 120$ すなわち 3° ステップで120方向からデータを取得した。ここで得られた120方向分のサイノグラム画像に対して、 180° 分に対応する1から60行目までを残すようにトリミングし、画像をリサイズして65方向分に伸長した（S122、S124）。本実施例は、このような処理を行ったデータに対しても、本手法が有効であることを示している。

。オーバーサンプル・サイノグラムに対応する第1ベクトル X_{os}' を生成した(S126、S128)。次に、間引き数列 $\{k\}$ に基づいて65方向65番目に当たる177.230°の検出方向の成分を間引くことにより、ベクトルデシメーション処理(S130)を実行して第2ベクトル X' を求めた。擬似逆行列 W_p^{-1} を離散ラドン逆変換行列 W_{sq}^{-1} のために用いることにより、第3ベクトル X を算出し(S132)、さらにデベクタライズ処理により再構成画像を得た(S134)。擬似逆行列 W_p^{-1} の算出は、後述するトレランスを1/19に設定して実施した。

[0072] 図14C～図14Eのためには、360°/120すなわち3°ステップで120方向の検出方向から取得したデータを対象にして、そのサイノグラム画像を図14Bと同様のサイズとなるようリサイズしたデータを使用した。図14C～図14EはImageJを利用し、図14CはFBP処理、図14DはML-EM処理(イタレーション数1)、図14EはBP処理により、それぞれの再構成画像を得た。

[0073] 図14B～図14Eから明らかなように、擬似逆行列 W_p^{-1} を利用する追加の画像再構成手法ではFBP、ML-EM、BPとの比較で良好な品質での再構成像を得ることができることを確認した。

[0074] また、図15は、トレランスを変更して算出した擬似逆行列 W_p^{-1} により生成した再構成画像を含んでおり、図15A～図15Jは各図に付す値にトレランス値を設定したものである。図15から分かるように、中性子線CTの場合においても、トレランスを1/1とすると再構成画像は認識できる像を構成しない。また、トレランスを小さくするにつれて再構成画像は解像度を増してゆくが、1/13以降は比較的安定している。

[0075] 図16は、本追加の画像再構成手法における擬似逆行列 W_p^{-1} の例であり、図16Aは、図7Bの正方システム行列 W_{sq} に対して求めた擬似逆行列 W_p^{-1} 、図16Bは、擬似逆行列 W_p^{-1} を正方システム行列 W_{sq} に左から作用させて得られる行列を示す。図8Aと図16Aとの比較から、同一の正方システム行列 W_{sq} を対象にして算出されていても、擬似逆行列 W_p^{-1} は離散ラドン逆変

換行列 W_{sq}^{-1} とは一致しない。その場合であっても、図8Bと図16Bとの比較から、逆行列 W_p^{-1} を正方システム行列 W_{sq} に左から作用させた結果のみを見ると、単位行列に近似できる行列が算出される。これは、逆行列 W_p^{-1} を正方システム行列 W_{sq} に右から作用させても同様である（図示しない）。

[0076] 以上のように、正則で逆行列を持つことが保証されている正方システム行列 W_{sq} を対象に擬似逆行列を利用することによって、十分な品質の再構成画像が生成されることを確認した。

[0077] なお、擬似逆行列のためのトレランス値は、一般に、小さい値を設定するほど算出される擬似逆行列が逆行列に近づき、再構成画像の解像度も高くなる。しかし、現実の測定装置を用いた測定においては、小さければ良好な再構成画像が得られるわけではない。幾何学的要因に帰着できない種々の攪乱要因が存在しているためである。例えば、検出信号に含まれるノイズや、ビームの不安定性、ビームの散乱、装置自体が持っている画像特性に起因した要因が、現状の測定装置に攪乱要因として残存している。通常これらの要因をすべて反映した装置全体の撮像性能が、例えば解像特性を示すMTF (Modulation Transfer Function) や、画像の粒状度の指標となるウィーナー・スペクトルによって評価されている。本追加の画像再構成手法において0より大きな所定のトレランス値（例えば、図13、図15では $1/13 \sim 1/19$ ）を用いることにより、幾何学的要因以外の攪乱要因を除外するフィルター動作が実現する。このフィルター動作は、トレランス値を増減することによりその効果を容易に調整できることから、解像度を重視するか、定量性を重視するかなどの着目する画像特性に応じて必要な再構成像を作成することに役立ちうる。

[0078] 6. 変形例

本実施形態は、断層画像データ取得方法、断層画像データの取得装置やそのためのコンピュータプログラムのいずれで実施する場合であっても、上述したもの以外の種々の形態で実施することができる。例えば、図4、5、7においてシステムAにおいて機器情報を決定する処理のためにユーザーが関与

することは必ずしも必要なく、ユーザーを系統Bの測定情報を取得することのみに関与させるような実施態様への変形も容易である。さらに、例えば本実施形態を実施するためのコンピュータプログラムで提供される場合には、照射および検出を行うハードウェアは既存のものや既に設置済のものを採用し、制御用コンピュータプログラムに上述した処理を新たに組み込むことで本実施形態を実装することもできる。このように、本実施形態の手法は、種々の実施態様を通じて実施することができる。

[0079] また、実施形態の変形に加え、その処理の細部を変形したものも本実施形態の一部をなす。その一例が、図3を参照して説明した検出素子22に対するビーム4についてのその画素のもつ寄与の決定手法である。図3で模様を付した部分の面積を寄与とする手法に加え、他の実用に付されている手法は本実施形態においても採用できる。例えば、面積に代え、掃く長さに応じた重みを持たせたり、その掃く長さを効率よく評価するシドンのアルゴリズム (Sidon's algorithm) を採用して上記寄与を決定することも有利である (非特許文献3)。さらに、さらなる高画質化を行うために、アンチエイリアス処理できるSunnegardh and Danielsonの方法を利用することも有利である (非特許文献4)。

[0080] さらに、図3以降の説明は、一例の断層撮像装置100の動作により説明したが、本実施形態は、必ずしも照射装置10を採用するものには限定されない。SPECT (単一光子放射断層撮影) など、照射装置を用いることなく対象物の断層撮影を行う他の手法においても、本実施形態を同様に適用することができる。

[0081] 以上、本開示の実施形態を具体的に説明した。上述の実施形態、変形例および実施例は、本出願において開示される発明を説明するために記載されたものであり、本出願の発明の範囲は、請求の範囲の記載に基づき定められるべきものである。実施形態の他の組合せを含む本開示の範囲内に存在する変形例もまた、請求の範囲に含まれるものである。

産業上の利用可能性

[0082] 本開示は、波または粒子が例えば対象物に照射されたりすることによって、対象物自体を波または粒子が透過するような任意の断層撮像手法のために利用可能であり、例えば、X線CTスキャナー、SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)、光トモグラフィー(Optical Tomography)、光学CT装置が挙げられる。

符号の説明

[0083] 100 断層撮像装置（断層画像データの取得装置）
2 対象物
4 ビーム
10 照射装置
20 検出装置
22 検出素子
30 間引き数列格納部
40 離散ラドン逆変換行列格納部
50 オーバーサンプル・システム行列格納部
60 正方システム行列格納部
150 制御装置
162 システム行列生成部
164 行列デシメーション処理部
166 逆行列算出部
174 動作制御部
176 離散ラドン変換処理部
178 ベクトル化処理部
180 ベクトルデシメーション処理部
182 離散ラドン逆変換処理部
184 画像データ生成部
212 オーバーサンプル・システム行列 W_{os}
214 正方システム行列 W_{sq}

2 2 6 オーバーサンプル・サイノグラム

2 2 8 第1ベクトル

2 3 0 第2ベクトル

2 3 2 第3ベクトル

請求の範囲

[請求項1]

少なくとも一列に並んだ N 個（ N は正の整数）の検出素子をもつ検出装置の検出範囲に対象物を配置するステップと、

照射装置により前記検出装置に向けて前記検出装置の検出対象となる波または粒子を照射しながら、または照射装置によらずに生じた前記波または粒子を対象物の各部に透過させながら、前記対象物の各部を透過した後の前記波または粒子を前記検出素子それぞれにより受けて前記検出素子別の強度値を得る検出動作を、前記対象物からみた前記波または粒子の相対的な検出方向における互いに重複しない（ $N + n$ ）方向（ n は1以上の整数）にわたって前記検出方向を変更して繰り返す検出ステップと、

各行および各列を各検出方向および各検出素子に対応させた（ $N + n$ ）行 N 列のオーバーサンプル・サイノグラムをベクトル化したものに相当する $N \times (N + n)$ 個の要素をもつ第1ベクトルを、前記検出動作における前記検出装置による検出信号から得るベクトル化ステップと、

前記第1ベクトルから、間引き順に当たる計 $n \times N$ 個の要素を除去して、残りの $N \times N$ 個の要素をもつ第2ベクトルを得るベクトルデシメーションステップと、

前記第2ベクトルに離散ラドン逆変換行列を作用させて、 $N \times N$ 個の要素をもつ第3ベクトルを得る離散ラドン逆変換ステップと、

前記第3ベクトルをデベクトル化することにより、前記対象物に対して静止した画素配置をもつ N 画素 $\times N$ 画素の二次元断層画像のための画像データを得る画像データ生成ステップと

を含む断層画像データ取得方法。

[請求項2]

前記ベクトルデシメーションステップより前に、

（ $N + n$ ）方向の前記検出方向それぞれに対応させて、前記波または粒子のうち N 個の前記検出素子のそれぞれに向かう部分の行路に対

する前記二次元断層画像の各画素の寄与を示す重み値を要素にもつ $N \times (N + n)$ 個の要素の列または行ベクトルを、前記二次元断層画像の画素に対応させて列または行方向に並べたオーバーサンプル・システム行列を得るステップと、

前記オーバーサンプル・システム行列から、前記間引き順に当たる計 $n \times N$ 個の行ベクトルまたは列ベクトルの要素を除去することにより正方システム行列を得る行列デシメーションステップと

をさらに含む

請求項 1 に記載の断層画像データ取得方法。

[請求項3] 前記行列デシメーションステップより後でかつ前記離散ラドン逆変換ステップより前に、

前記正方システム行列の逆行列を算出することにより前記離散ラドン逆変換行列を得る逆行列算出ステップ

をさらに含む

請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。

[請求項4] 前記行列デシメーションステップより後でかつ前記離散ラドン逆変換ステップより前に、

前記正方システム行列の擬似逆行列を算出することにより前記離散ラドン逆変換行列を得る擬似逆行列算出ステップ

をさらに含む

請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。

[請求項5] 前記行列デシメーションステップが、

1 以上 $N \times (N + n)$ 以下の整数から前記間引き順を与える数列を選択するステップであって、該数列が、1 以上 $N \times (N + n)$ 以下の整数のなす数列の要素から、選択された前記整数列の $N \times N$ 個の要素を除いて得た $n \times N$ 個の要素をもつ整数列であるステップ

を含むものである、

請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。

- [請求項6] 前記行列デシメーションステップが、
1 以上 $N \times (N + n)$ 以下の整数から前記間引き順を与える数列を選択するステップであって、該数列が、1 以上 $N \times (N + n)$ 以下の整数のなす数列の要素から、 $s \times N$ (s は 1 以上の整数) で終る連続する範囲の $N \times N$ 個の要素を除いて得た $n \times N$ 個の要素をもつ整数列であるステップ
を含むものである、
請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。
- [請求項7] 前記行列デシメーションステップが、
前記間引き順に当たる位置の要素を除くことにより得た前記正方形システム行列を対象に階数を決定するステップと、
前記階数が $N \times N$ に一致するかを判定するステップと
をさらに含んでいる、
請求項 5 または請求項 6 に記載の断層画像データ取得方法。
- [請求項8] 前記行列デシメーションステップが、
1 以上 $N \times (N + n)$ 以下の整数から前記間引き順を与える数列を選択するステップであって、該数列がランダムに重複なく選択された $n \times N$ 個の要素をもつ整数列であるステップ
を含むものである、
請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。
- [請求項9] 前記行列デシメーションステップが、
1 以上 $N \times (N + n)$ 以下の整数から前記間引き順を与える数列を選択するステップであって、該数列が $(s - 1) \times N + 1$ (s は 1 以上の整数) から始まり連続する範囲の $n \times N$ 個の要素をもつ整数列であるステップ
を含むものである、
請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。
- [請求項10] 前記行列デシメーションステップが、

前記間引き順に当たる位置の要素を除くことにより得た前記正方システム行列を対象に階数を決定するステップと、

前記階数が $N \times N$ に一致するかを判定するステップと
をさらに含んでいる、

請求項 8 または請求項 9 に記載の断層画像データ取得方法。

[請求項11] 前記間引き順を与える数列の要素に対応する検出方向の前記検出ステップでの検出動作が省略されている、

請求項 6 または請求項 9 に記載の断層画像データ取得方法。

[請求項12] 前記行列デシメーションステップが、

前記オーバーサンプル・システム行列の要素の行ベクトルまたは列ベクトルの集合から、グラム・シュミットの直交化法により、線形独立な $N \times N$ 個の行ベクトルまたは列ベクトルの群を生成し、前記行ベクトルまたは列ベクトルの群を列方向または行方向に並べることにより前記正方システム行列を得るステップと、

前記オーバーサンプル・システム行列の要素の行ベクトルのうち、前記線形独立な行ベクトルの群の生成に用いられなかったものの行番号または列番号を前記間引き順のために選択するステップと

を含むものである、

請求項 2 に記載の断層画像データ取得方法。

[請求項13] 少なくとも一列に並んだ N 個（ N は1以上の整数）の検出素子をもつ検出装置と、

前記検出装置の検出対象となる波または粒子の照射装置により前記検出装置に向けて前記波または粒子を照射しながら、または照射装置によらずに生じた前記波または粒子を対象物の各部に透過させながら、前記検出装置の検出範囲に配置した対象物との間の検出方向を変更し、前記対象物の各部を透過した後の前記波または粒子を前記検出素子それぞれにより検出するよう、前記検出装置を制御する制御装置と、

を備える断層画像データの取得装置であって
間引き順を与える数列データを格納する間引き数列格納部と、
離散ラドン逆変換行列を格納する離散ラドン逆変換行列格納部と
をさらに備え、
前記制御装置は、

前記対象物からみた前記波または粒子の相対的な検出方向における互いに重複しない $(N + n)$ 方向 (n は 1 以上の整数) にわたって前記検出方向を変更し、前記検出装置に、各行および各列を各検出方向および各検出素子に対応させた $(N + n)$ 行 N 列のオーバーサンプル・サイノグラムのための検出信号を出力させる離散ラドン変換処理部と、

前記検出信号から、前記オーバーサンプル・サイノグラムをベクトル化したものに相当する $N \times (N + n)$ 個の要素をもつ第 1 ベクトルを得るベクトル化処理部と、

前記第 1 ベクトルから、前記間引き順を与える数列データに応じ計 $n \times N$ 個の要素を除去して、残りの $N \times N$ 個の要素をもつ第 2 ベクトルを得るベクトルデシメーション処理部と、

前記第 2 ベクトルに前記離散ラドン逆変換行列を作用させて、 $N \times N$ 個の要素をもつ第 3 ベクトルを得る離散ラドン逆変換処理部と、

前記第 3 ベクトルをデベクトル化することにより、前記対象物に対して静止した画素配置をもつ N 画素 $\times$ N 画素の二次元断層画像のための画像データを得る画像データ生成部と

を備えている断層画像データ取得装置。

[請求項14]

オーバーサンプル・システム行列格納部と、
正方システム行列格納部と
をさらに備え、
前記制御装置は、

$(N + n)$ 方向の前記検出方向それぞれに対応させて、前記波ま

たは粒子のうち N 個の前記検出素子のそれぞれに向かう部分の行路に対する前記二次元断層画像の各画素の寄与を示す重み値を要素にもつ $N \times (N + n)$ 個の要素の列ベクトルまたは行ベクトルを、前記二次元断層画像の画素に対応させて列方向または行方向に並べたオーバーサンプル・システム行列を得て前記オーバーサンプル・システム行列格納部に格納するオーバーサンプル・システム行列生成部と、

前記オーバーサンプル・システム行列から、前記間引き順に当たる計 $n \times N$ 個の行ベクトルまたは列ベクトルの要素を除去することにより正方システム行列を得て前記正方システム行列格納部に格納する行列デシメーション処理部と、

前記正方システム行列の逆行列を算出することにより前記離散ラドン逆変換行列を得て前記離散ラドン逆変換行列格納部に格納する逆行列算出部と

をさらに備えるものである

請求項 13 に記載の断層画像データ取得装置。

[請求項15]

オーバーサンプル・システム行列格納部と、

正方システム行列格納部と

をさらに備え、

前記制御装置は、

$(N + n)$ 方向の前記検出方向それぞれに対応させて、前記波または粒子のうち N 個の前記検出素子のそれぞれに向かう部分の行路に対する前記二次元断層画像の各画素の寄与を示す重み値を要素にもつ $N \times (N + n)$ 個の要素の列ベクトルまたは行ベクトルを、前記二次元断層画像の画素に対応させて列方向または行方向に並べたオーバーサンプル・システム行列を得て前記オーバーサンプル・システム行列格納部に格納するオーバーサンプル・システム行列生成部と、

前記オーバーサンプル・システム行列から、前記間引き順に当たる計 $n \times N$ 個の行ベクトルまたは列ベクトルの要素を除去することにより

より正方システム行列を得て前記正方システム行列格納部に格納する行列デシメーション処理部と、

前記正方システム行列の擬似逆行列を算出することにより前記離散ラドン逆変換行列を得て前記離散ラドン逆変換行列格納部に格納する擬似逆行列算出部と

をさらに備えるものである

請求項 13 に記載の断層画像データ取得装置。

[請求項16]

少なくとも一列に並んだ N 個 (N は正の整数) の検出素子をもつ検出装置と、

前記検出装置の検出対象となる波または粒子の照射装置により前記検出装置に向けて前記波または粒子を照射しながら、または照射装置によらずに生じた前記波または粒子を対象物の各部に透過させながら、前記波または粒子の検出装置の検出範囲に配置した対象物に対する前記波または粒子の相対的な検出方向を変更し、前記対象物の各部を透過した後の前記波または粒子を前記検出素子それぞれにより検出するよう、前記検出装置を制御する制御装置と

を備える断層画像データの取得装置のための制御プログラムであって

前記制御装置に、

前記対象物からみた前記波または粒子の相対的な検出方向における互いに重複しない ($N + n$) 方向 (n は1以上の整数) にわたって前記検出方向を変更し、前記検出装置に、各行および各列を各検出方向および各検出素子に対応させた ($N + n$) 行 N 列のオーバーサンプル・サイノグラムのための検出信号を前記検出装置に取得させる離散ラドン変換ステップと、

前記検出信号から、前記オーバーサンプル・サイノグラムをベクトル化したものに相当する $N \times (N + n)$ 個の要素をもつ第1ベクトルを得るベクトル化ステップと、

間引き数列格納部から間引き順を与える数列データを読み出して、前記第1ベクトルから、前記数列データに応じ計 $n \times N$ 個の要素を除去して、残りの $N \times N$ 個の要素をもつ第2ベクトルを得るベクトルデシメーションステップと、

離散ラドン逆変換行列格納部から離散ラドン逆変換行列を読み出して、前記第2ベクトルに前記離散ラドン逆変換行列を作用させて、 $N \times N$ 個の要素をもつ第3ベクトルを得る離散ラドン逆変換ステップと、

前記第3ベクトルをデベクトル化することにより、前記対象物に対して静止した画素配置をもつ N 画素 $\times N$ 画素の二次元断層画像のための画像データを得る画像データ生成ステップと

を実行させる制御プログラム。

[請求項17]

前記制御装置に、

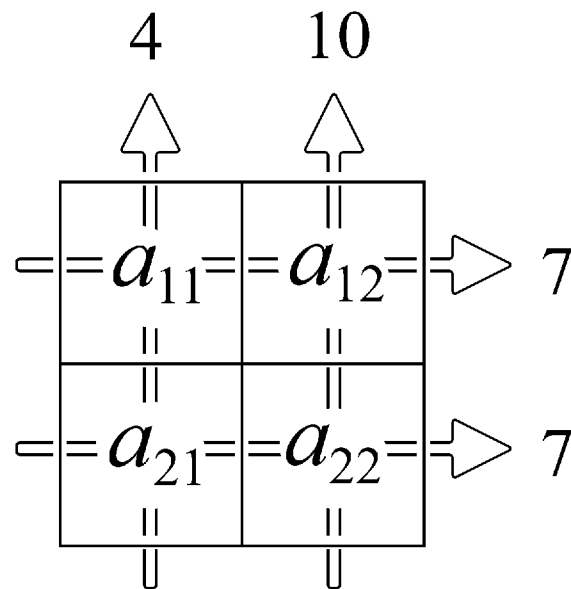
($N + n$) 方向の前記検出方向それぞれに対応させて、前記波または粒子のうち N 個の前記検出素子のそれぞれに向かう部分の行路に対する前記二次元断層画像の各画素の寄与を示す重み値を要素にもつ $N \times (N + n)$ 個の要素の列ベクトルまたは行ベクトルを、前記二次元断層画像の画素に対応させて列方向または行方向に並べたオーバーサンプル・システム行列を得てオーバーサンプル・システム行列格納部に格納するステップと、

前記オーバーサンプル・システム行列から、前記間引き順に当たる計 $n \times N$ 個の行ベクトルまたは列ベクトルの要素を除去することにより正方システム行列を得て正方システム行列格納部に格納するステップと、

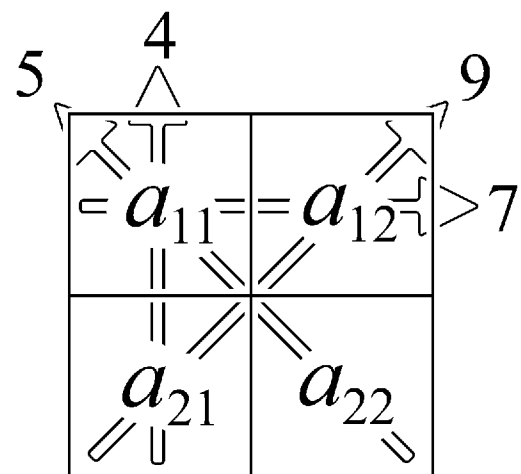
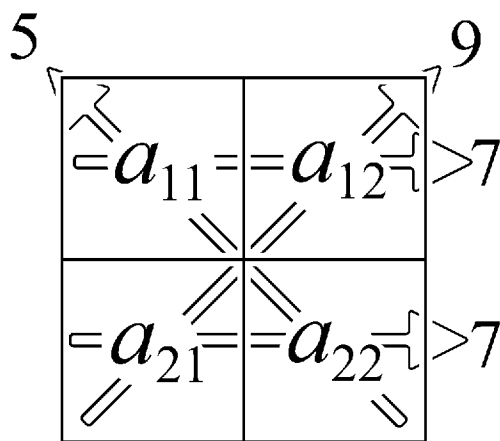
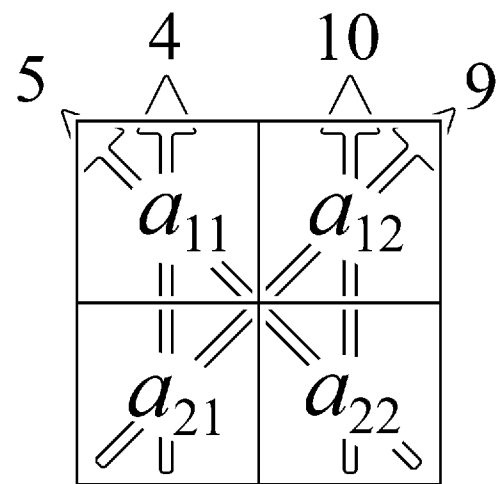
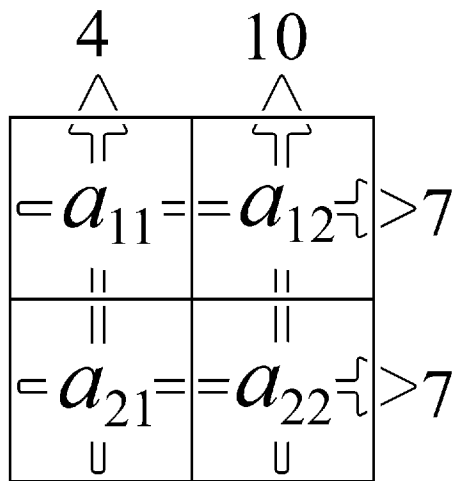
前記正方システム行列の逆行列を算出することにより前記離散ラドン逆変換行列を得て離散ラドン逆変換行列格納部に格納する逆行列算出ステップと

をさらに実行させる請求項16に記載の制御プログラム。

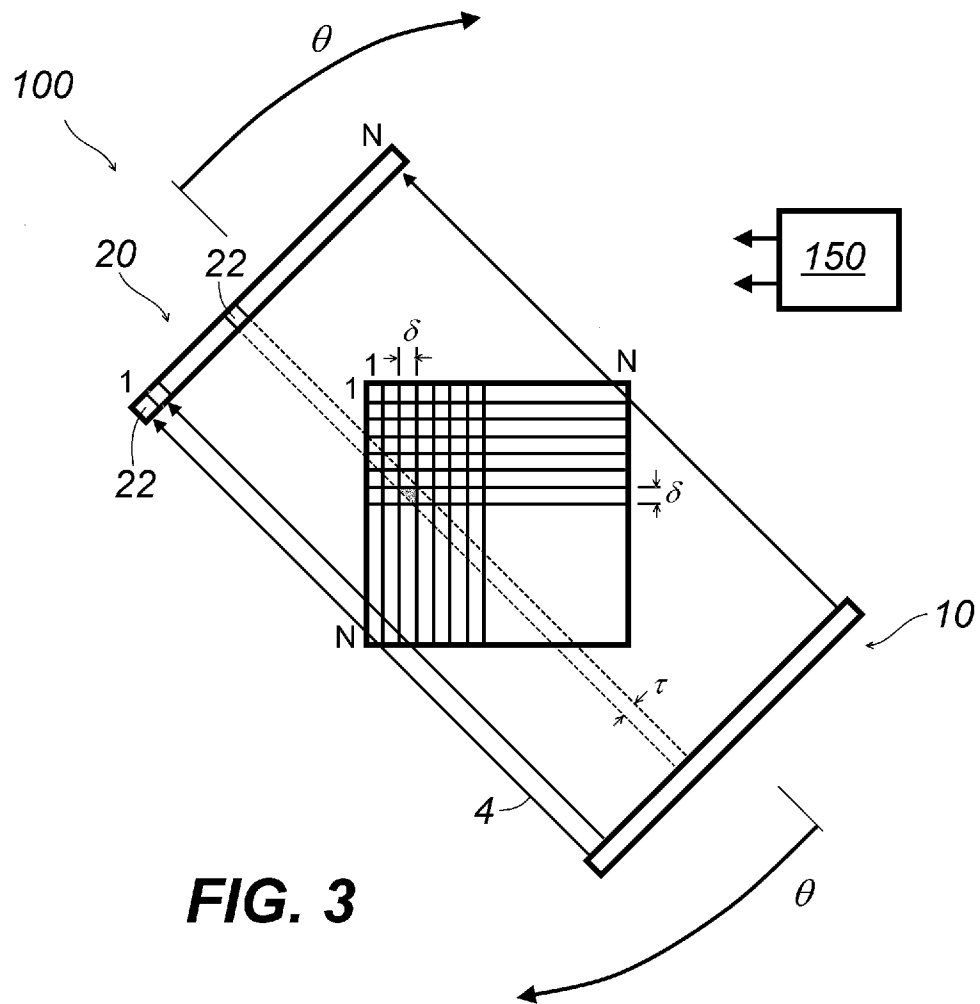
[図1]

**FIG. 1**

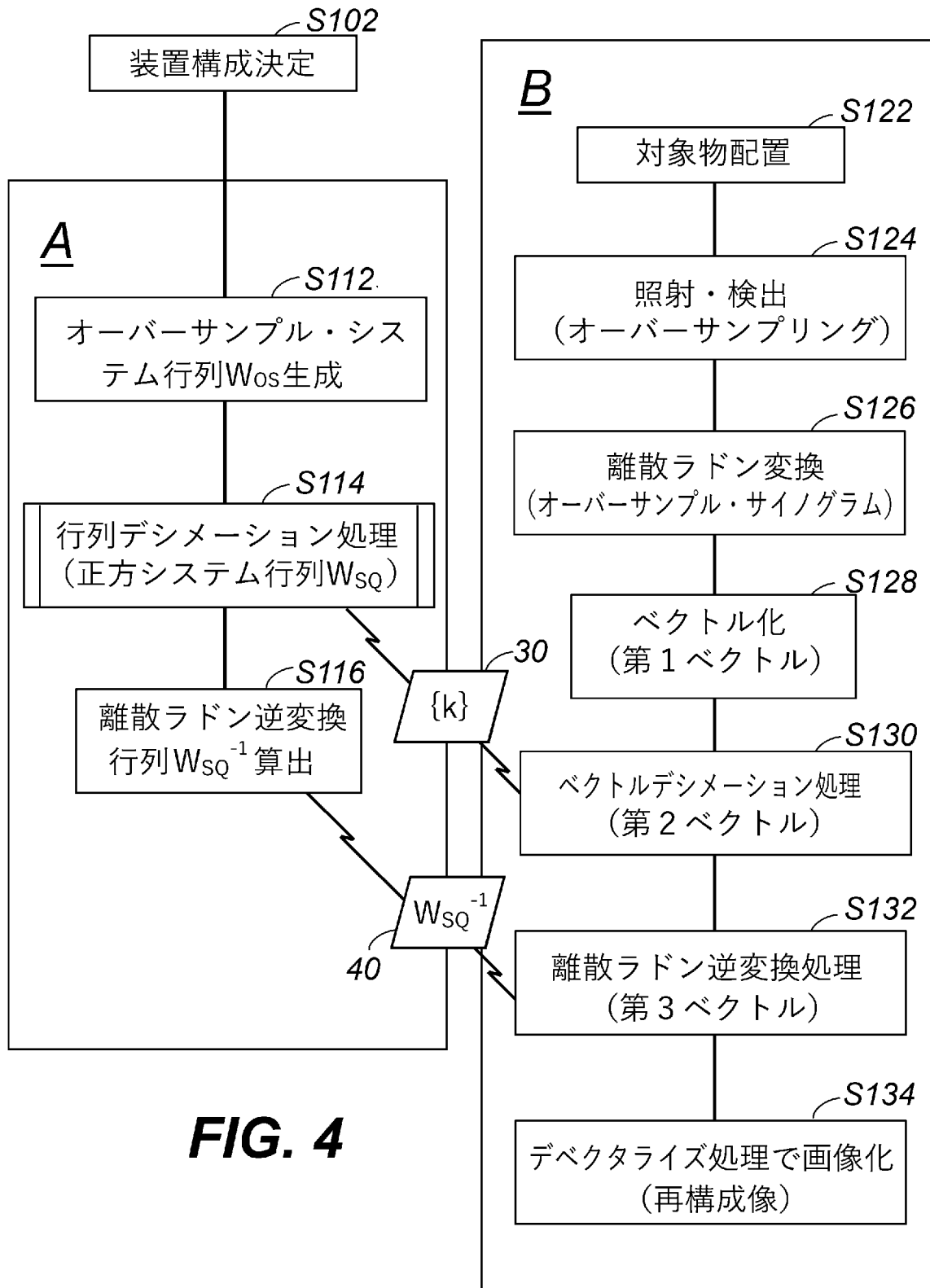
[図2]



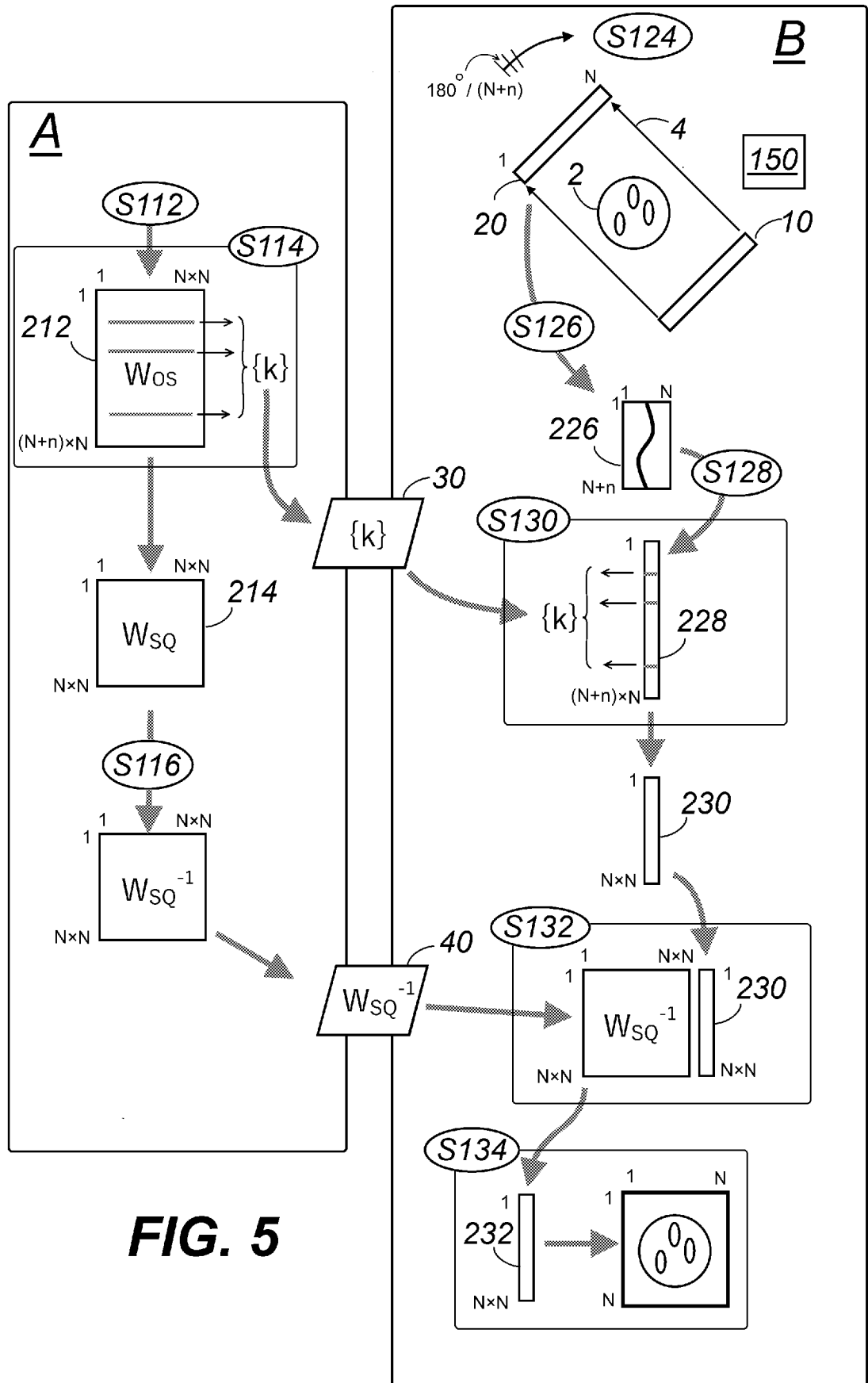
[図3]



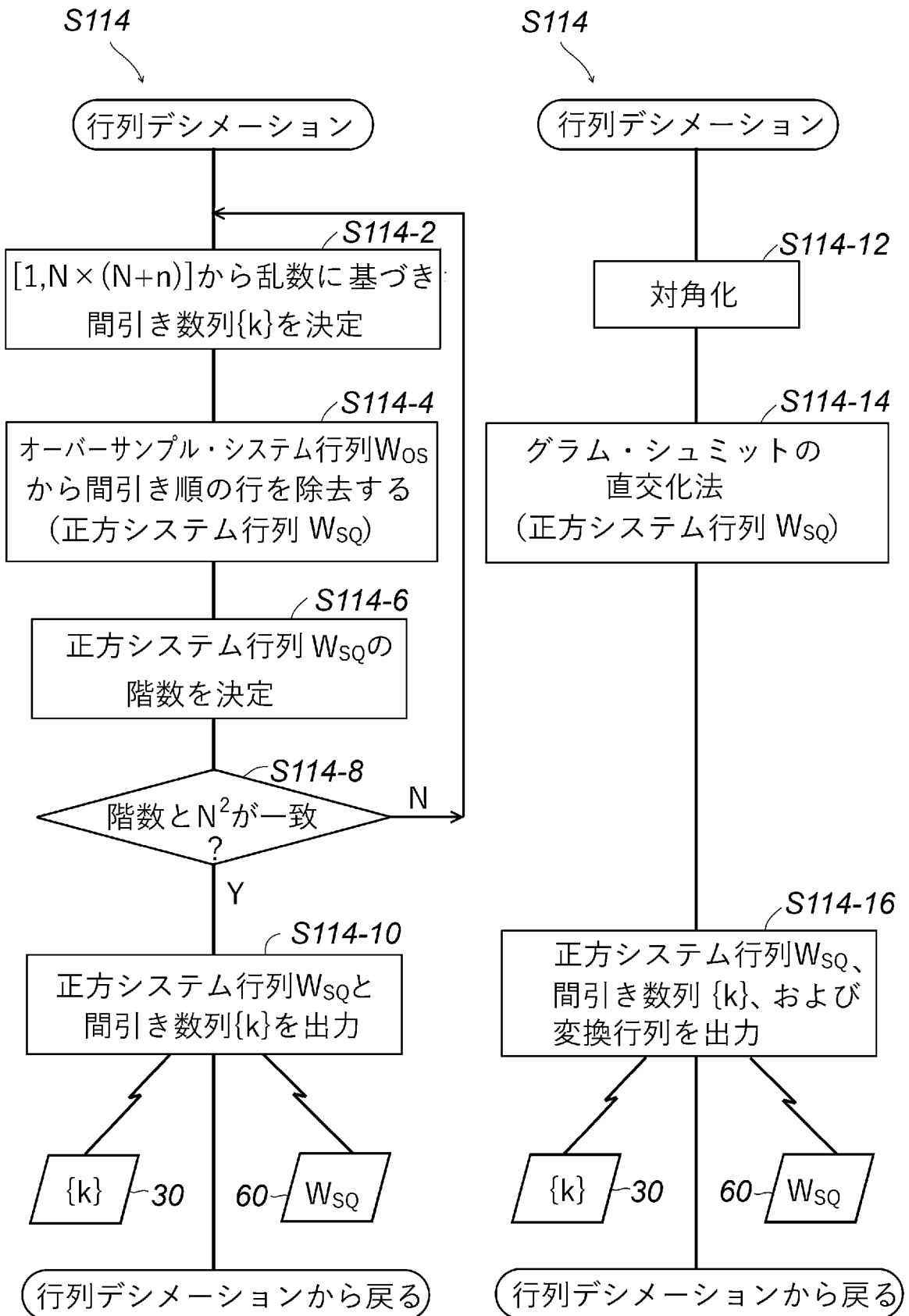
[図4]



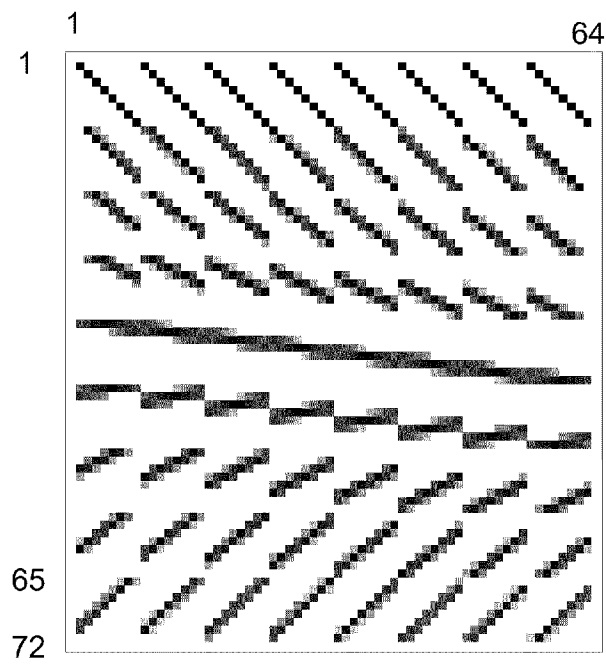
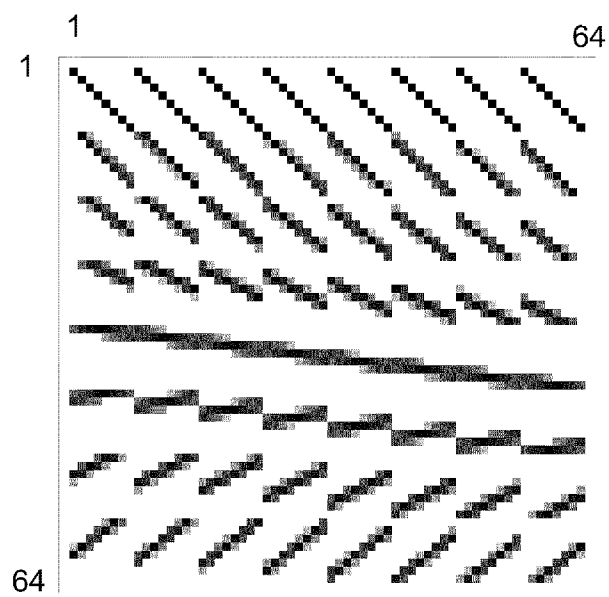
[図5]

**FIG. 5**

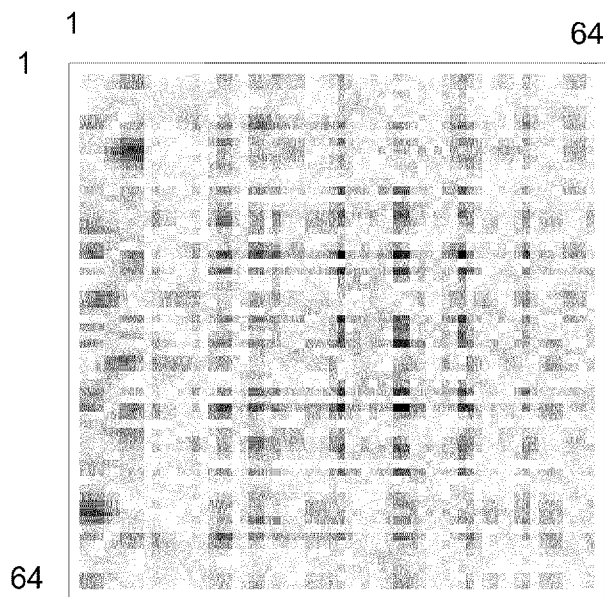
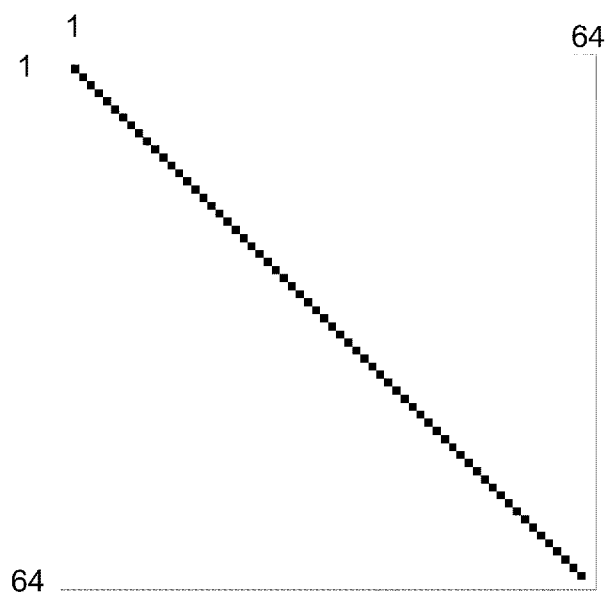
[図6]

**FIG. 6A****FIG. 6B**

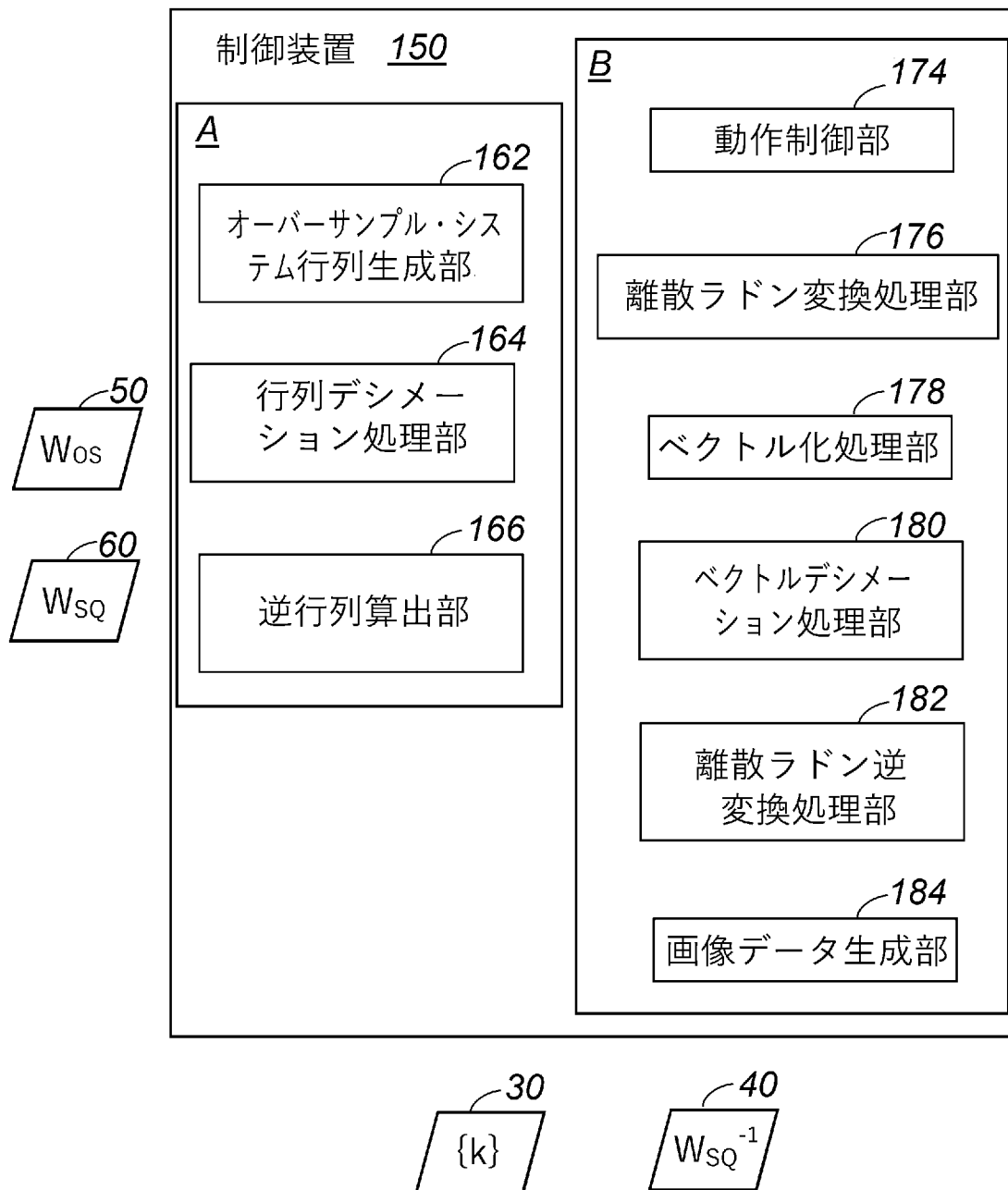
[図7]

**FIG. 7A****FIG. 7B**

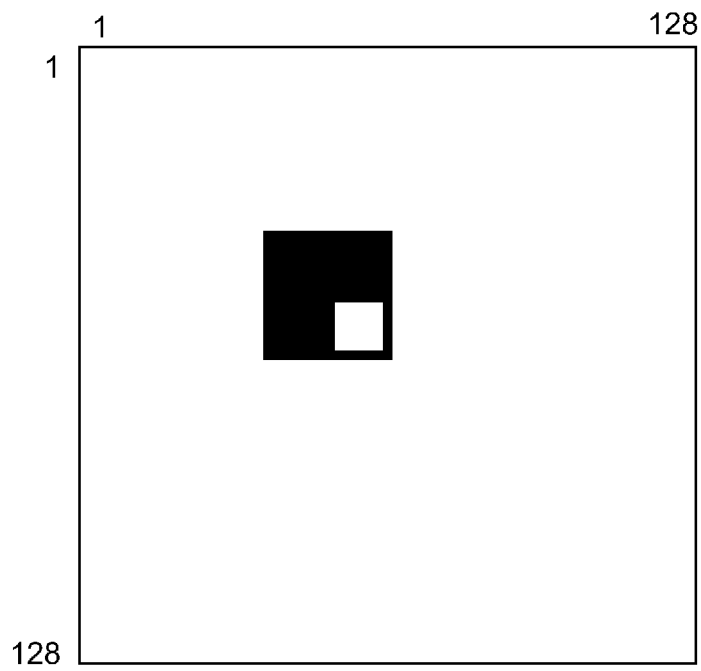
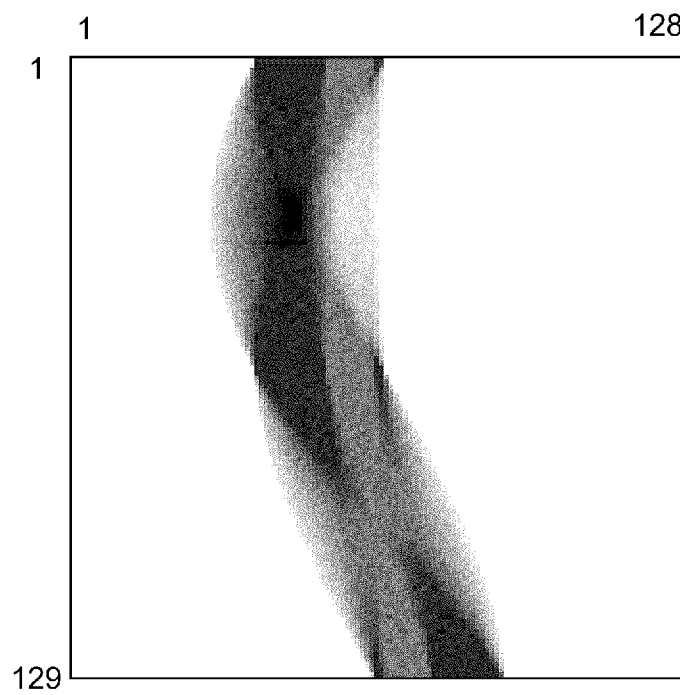
[図8]

**FIG. 8A****FIG. 8B**

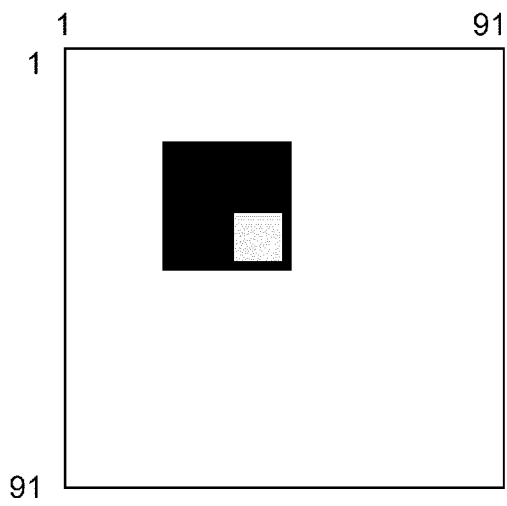
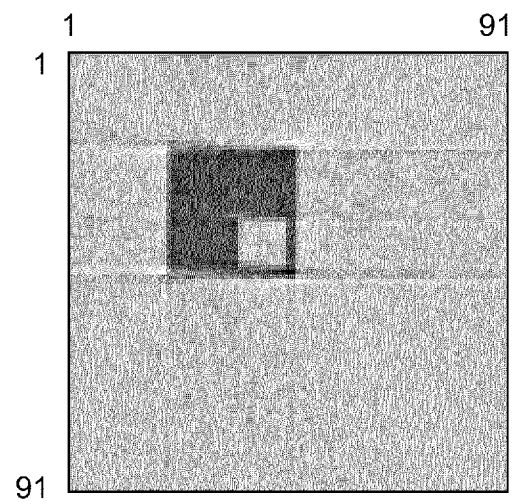
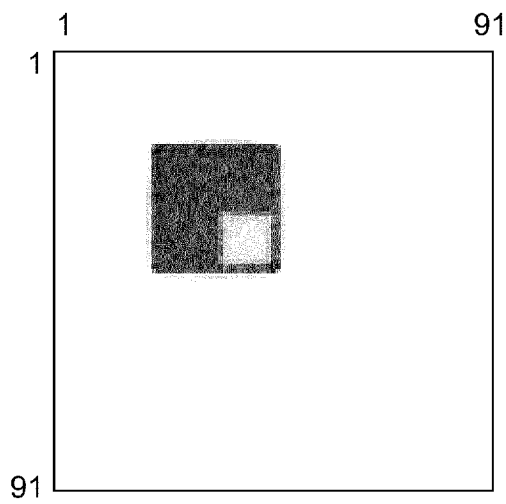
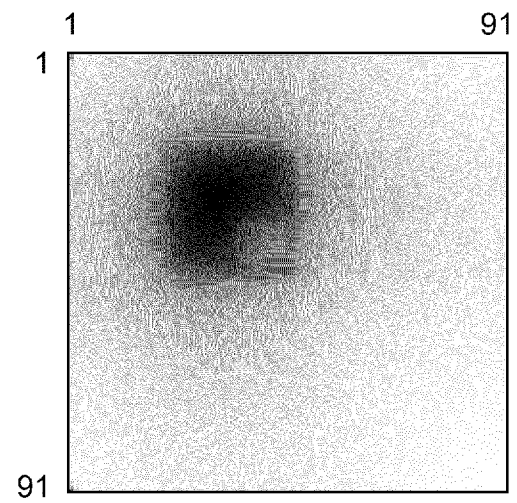
[図9]

**FIG. 9**

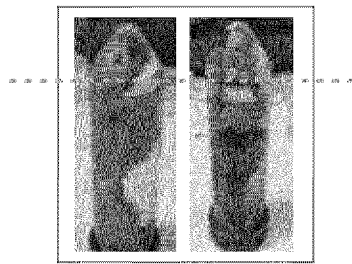
[図10]

**FIG. 10A****FIG. 10B**

[図11]

**FIG. 11A****FIG. 11B****FIG. 11C****FIG. 11D**

[図12]



Original
(mouse)

FIG. 12A

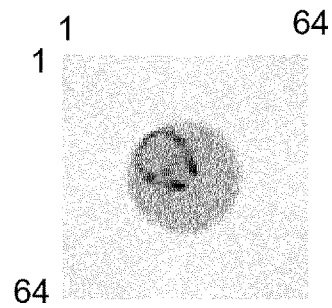


FIG. 12B

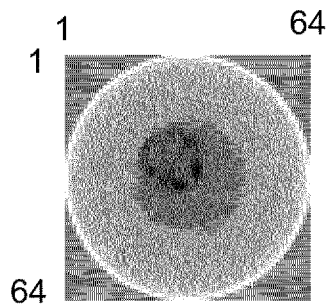


FIG. 12C

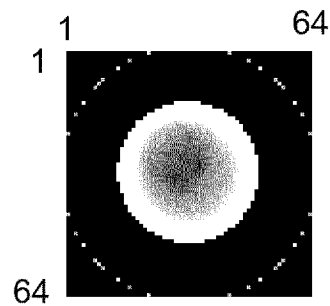


FIG. 12D

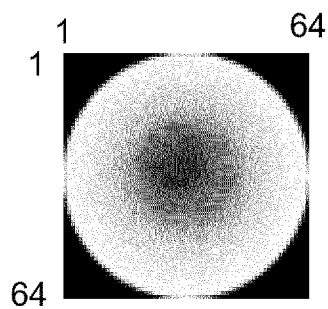
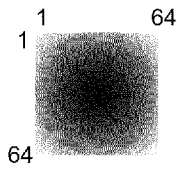
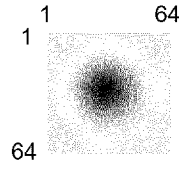
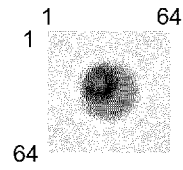
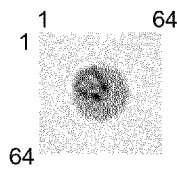
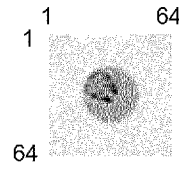
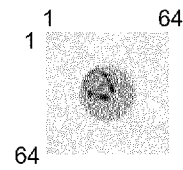
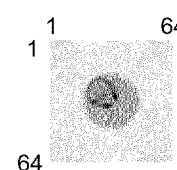
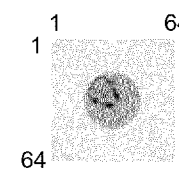
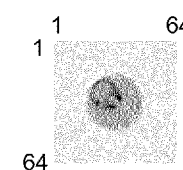
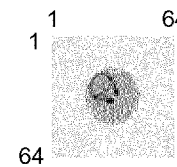
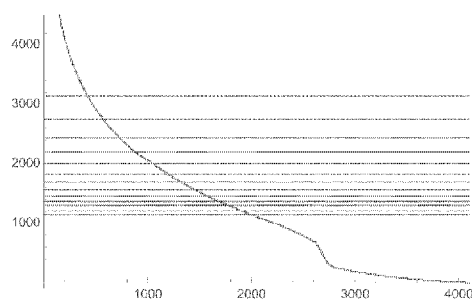
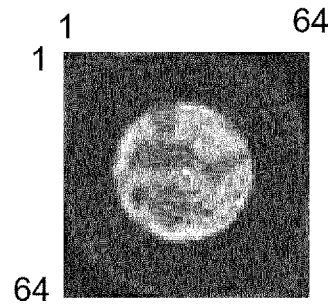
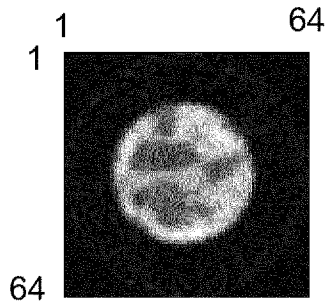
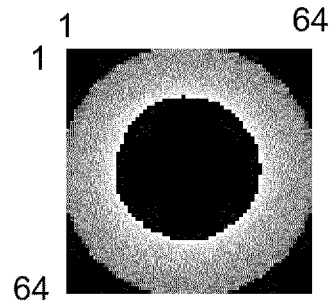
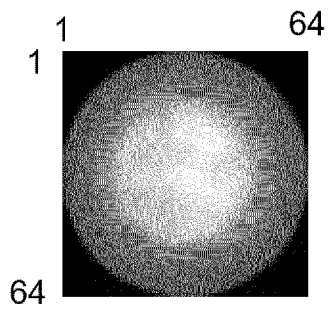


FIG. 12E

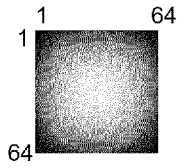
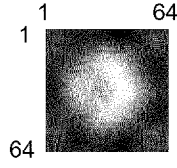
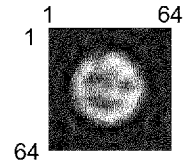
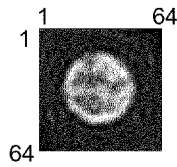
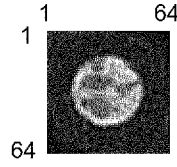
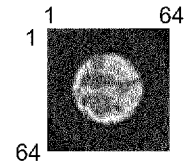
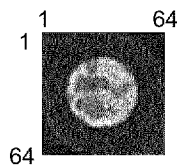
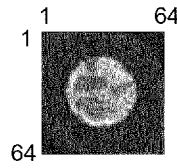
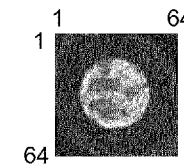
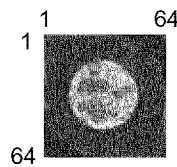
[図13]

tolerance $t = 1/1$ **FIG. 13A** $1/3$ **FIG. 13B** $1/5$ **FIG. 13C** $1/7$ **FIG. 13D** $1/9$ **FIG. 13E** $1/11$ **FIG. 13F** $1/13$ **FIG. 13G** $1/15$ **FIG. 13H** $1/17$ **FIG. 13I** $1/19$ **FIG. 13J****FIG. 13K**

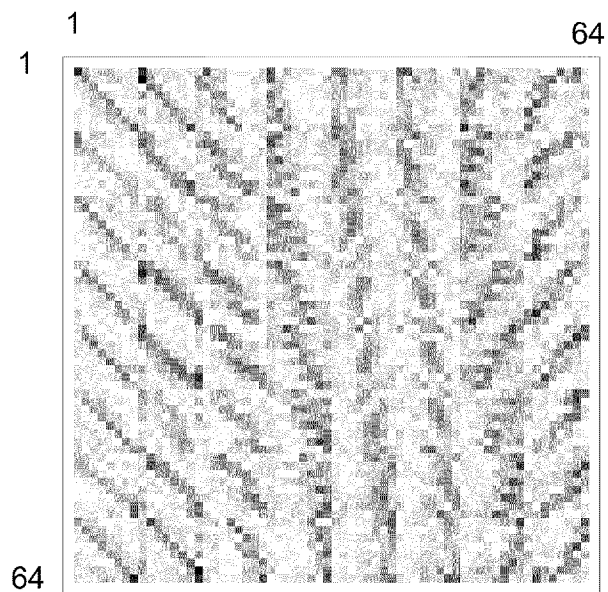
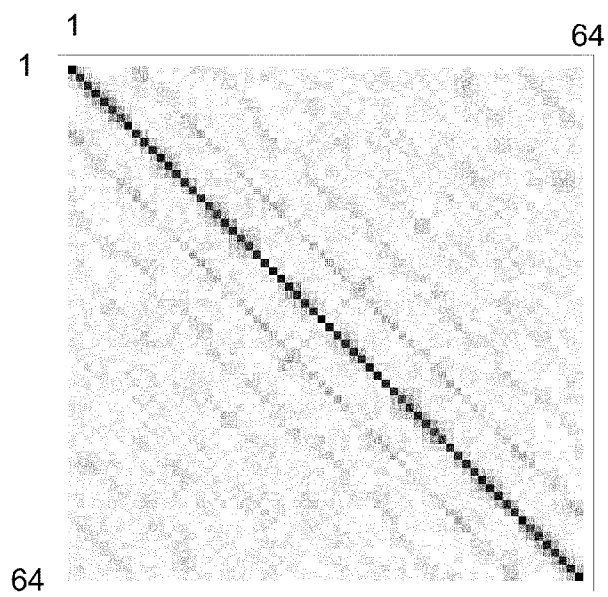
[図14]

**FIG. 14A****FIG. 14B****FIG. 14C****FIG. 14D****FIG. 14E**

[図15]

tolerance $t = 1/1$ **FIG. 15A** $1/3$ **FIG. 15B** $1/5$ **FIG. 15C** $1/7$ **FIG. 15D** $1/9$ **FIG. 15E** $1/11$ **FIG. 15F** $1/13$ **FIG. 15G** $1/15$ **FIG. 15H** $1/17$ **FIG. 15I** $1/19$ **FIG. 15J**

[図16]

**FIG. 16A****FIG. 16B**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/021164

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. G01N23/046 (2018.01) i, A61B6/03 (2006.01) i, G01N21/17 (2006.01) i,
G06F17/16 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. G01N23/046, A61B6/03, G01N21/17, G06F17/16

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2017/82785 A1 (PRISMATIC SENSORS AB) 18 May 2017 & JP 2018-537166 A & US 2017/0269008 A1 & CN 108369284 A & KR 10-2018-0082445 A	1-17

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
---	---

Date of the actual completion of the international search
19 August 2019 (19.08.2019)

Date of mailing of the international search report
27 August 2019 (27.08.2019)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/021164

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-526283 A (HELMHOLTZ ZENTRUM MUENCHEN DEUTSCHES FORSCHUNGSZENTRUM FUER GESUNDHEIT UND UMWELT(GMBH)) 24 July 2008 & US 2008/0130974 A1 & WO 2006/069708 A1 & WO 2006/069709 A1 & EP 1677253 A1 & CA 2584900 A1 & KR 10-2007-0103733 A & CN 101095164 A	1-17
A	JP 2016-49455 A (TOSHIBA CORP.) 11 April 2016 & US 2016/0063694 A1	1-17
A	WO 2013/105583 A1 (TOSHIBA CORP.) 18 July 2013 & JP 2013-141608 A & US 2013/0177225 A1 & EP 2803320 A1 & CN 104039233 A	1-17
A	ARCADU, F. et al., "A Forward Regriding Method With Minimal Oversampling for Accurate and Efficient Iterative Tomographic Algorithms", IEEE TRANSACTION ON IMAGE PROCESSING, vol. 25, no. 3, March 2016, pp. 1207-1218	1-17
A	川村他, ポリマーゲル線量計のための光学 CT を用いた線量評価—0次元から2次元読取—, 医学物理, 第37巻 第2号(2017), 111-116頁, (KAWAMURA, et al., "Optical Computed Tomography for Polymer Gel Dosimetry", Japanese Journal of Medical Physics, vol. 37, no. 2(2017), pp. 111-116)	1-17

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N23/046(2018.01)i, A61B6/03(2006.01)i, G01N21/17(2006.01)i, G06F17/16(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N23/046, A61B6/03, G01N21/17, G06F17/16

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2017/82785 A1 (PRISMATIC SENSORS AB) 2017.05.18, & JP 2018-537166 A & US 2017/0269008 A1 & CN 108369284 A & KR 10-2018-0082445 A	1-17

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

19.08.2019

国際調査報告の発送日

27.08.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

佐藤 仁美

2W

4073

電話番号 03-3581-1101 内線 3258

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2008-526283 A (ヘルムホルツ・ツェントルム・ミュンヘン・ ドイチェス・フォルシュングスツェントルム・フューア・ゲズント ハイト・ウント・ウムベルト (ゲーエムベーハー)) 2008.07.24, & US 2008/0130974 A1 & WO 2006/069708 A1 & WO 2006/069709 A1 & EP 1677253 A1 & CA 2584900 A1 & KR 10-2007-0103733 A & CN 101095164 A	1 - 1 7
A	JP 2016-49455 A (株式会社東芝) 2016.04.11, & US 2016/0063694 A1	1 - 1 7
A	WO 2013/105583 A1 (株式会社東芝) 2013.07.18, & JP 2013-141608 A & US 2013/0177225 A1 & EP 2803320 A1 & CN 104039233 A	1 - 1 7
A	ARCADU, F. ET AL., A Forward Regriding Method With Minimal Oversampling for Accurate and Efficient Iterative Tomographic Algorithms, IEEE TRANSACTION ON IMAGE PROCESSING, VOL. 25, NO. 3, MARCH 2016, pages 1207-1218	1 - 1 7
A	川村他, ポリマーゲル線量計のための光学C Tを用いた線量評価— 0次元から2次元読取—, 医学物理, 第37巻 第2号 (201 7), 111-116頁	1 - 1 7