

(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
2024年8月2日(02.08.2024)

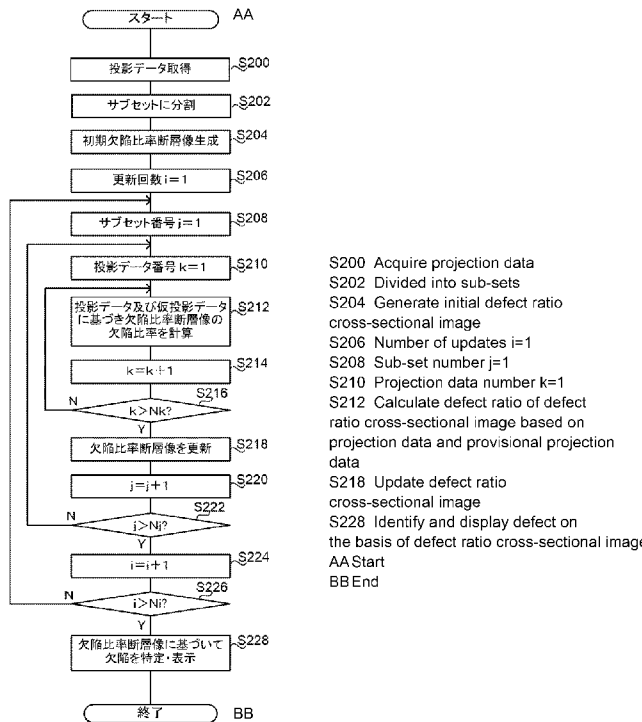


(10) 国際公開番号
WO 2024/157779 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 23/18 (2018.01) G01N 23/087 (2018.01)
G01N 23/046 (2018.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2024/000433
- (22) 国際出願日: 2024年1月11日(11.01.2024)
- (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 2023-008366 2023年1月23日(23.01.2023) JP
- (71) 出願人: 富士フイルム株式会社 (FUJIFILM CORPORATION) [JP/JP]; 〒1068620 東京都港区西麻布2丁目2番30号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 勝山 公人 (KATSUYAMA, Kimito); 〒1068620 東京都港区西麻布2丁目2番30号 富士フイルム株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 弁理士法人太陽国際特許事務所(TAIYO, NAKAJIMA & KATO); 〒1600022 東京都新宿区新宿4丁目3番17号 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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,

(54) Title: INFORMATION PROCESSING DEVICE, INFORMATION PROCESSING METHOD, AND INFORMATION PROCESSING PROGRAM

(54) 発明の名称: 情報処理装置、情報処理方法、及び情報処理プログラム



(57) Abstract: This information processing device: acquires projection data corresponding to each of at least two imaging positions for which the direction of irradiation of radiation to an examination object differs; and identifies a defect in the examination object on the basis of the projection data, attenuation information of the examination object, and shape information of the examination object.

(57) 要約: 情報処理装置は、検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物の形状情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する。



WO 2024/157779 A1

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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, 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 :

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

明 細 書

発明の名称：

情報処理装置、情報処理方法、及び情報処理プログラム

技術分野

[0001] 本開示は、情報処理装置、情報処理方法、及び情報処理プログラムに関する。

背景技術

[0002] 機械部品や構造物等の検査対象物の欠陥を、検査対象物を破壊することなく検出する非破壊検査技術の一つとして、検査対象物にX線等の放射線を照射して、検査対象物の欠陥を検出する技術が知られている。放射線による非破壊検査においては、欠陥の3次元位置を特定できることが望ましく、そのためには複数の異なる方向から放射線を検査対象物に照射して投影データを取得し、検査対象物の内部構造を断層像として生成する必要がある。

[0003] また、検査対象物のX線画像を取得し、検査対象物の形状が異なる複数のシミュレーションX線画像から検査対象物の形状が最も近いシミュレーションX線画像を取得し、X線画像とシミュレーションX線画像との差分に基づき検査対象物の欠陥を検出する方法が知られている（特開2014-16239号公報参照）。

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 放射線により検査対象物の欠陥の3次元位置を特定するためには、放射線を多くの異なる方向から検査対象物に照射して投影データを取得する必要があるため欠陥検査に時間が掛かってしまう。また、検査対象物によっては投影方向が制限される場合もあり、その様な場合、欠陥の3次元位置の特定は困難である。また、特開2014-16239号公報に記載の技術は、検査対象物の投影データにおける欠陥を検出する方法であり、欠陥が存在する3次元位置を特定することはできない。

[0005] 本開示は、少ない数や、投影方向が制限された投影データからでも、欠陥の状態等によらず、欠陥を3次元位置と共に精度良く特定することができる情報処理装置、情報処理方法、及び情報処理プログラムを提供する。

課題を解決するための手段

[0006] 本開示の第1の態様は、情報処理装置であって、少なくとも1つのプロセッサを備え、プロセッサは、検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、投影データと、検査対象物の減弱情報と、検査対象物の形状情報とに基づいて検査対象物の欠陥を特定する。

[0007] 本開示の第2の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、減弱情報は、検査対象物に含まれる少なくとも2つの部材の各々に応じた減弱情報を含んでもよい。

[0008] 本開示の第3の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、減弱情報は、空気の減弱情報を含んでもよい。

[0009] 本開示の第4の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、減弱情報は、少なくとも2つのエネルギー帯域における減弱情報を含んでもよい。

[0010] 本開示の第5の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、プロセッサは、欠陥の減弱情報を取得し、欠陥の減弱情報に基づいて欠陥を特定してもよい。

[0011] 本開示の第6の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、プロセッサは、形状情報に基づいた検査対象物の3次元空間における分布において、検査対象物の部材の無い領域と、検査対象物の部材の有る領域とを区別して欠陥を特定してもよい。

[0012] 本開示の第7の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、プロセッサは、検査対象物に対して放射線を照射した場合に得られる仮投影データを、検査対象物の減弱情報と形状情報とに基づいて生成し、仮投影データに基づいて欠陥を特定してもよい。

- [0013] 本開示の第8の態様の情報処理装置は、第7の態様の情報処理装置において、プロセッサは、投影データにおいて、仮投影データとの大小関係が異なるデータを区別して欠陥を特定してもよい。
- [0014] 本開示の第9の態様の情報処理装置は、第7の態様の情報処理装置において、プロセッサは、投影データにおいて、仮投影データとの差分の大きさが異なるデータを区別して欠陥を特定してもよい。
- [0015] 本開示の第10の態様の情報処理装置は、第1の態様の情報処理装置において、プロセッサは、検査対象物の散乱の情報に基づいて欠陥を特定してもよい。
- [0016] また、本開示の第11の態様は、情報処理方法であって、検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、投影データと、検査対象物の減弱情報と、検査対象物の形状情報とに基づいて検査対象物の欠陥を特定する処理をプロセッサが実行する。
- [0017] また、本開示の12の態様は、情報処理プログラムであって、検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、投影データと、検査対象物の減弱情報と、検査対象物の形状情報とに基づいて検査対象物の欠陥を特定する処理をプロセッサに実行させる。

発明の効果

- [0018] 上記態様によれば、本開示の情報処理装置、情報処理方法、及び情報処理プログラムは、少ない数や、投影方向が制限された投影データからでも、欠陥の状態等によらず、欠陥を3次元位置と共に精度良く特定することができる。

図面の簡単な説明

- [0019] [図1]例示的实施形態の欠陥特定システムについて全体の構成の一例を示す構成図である。
- [図2]検査対象物及び欠陥の例について示す斜視図である。

[図3]形状情報について説明するための図である。

[図4]情報処理装置の構成の一例を示すブロック図である。

[図5]情報処理装置により実行される検査対象物の欠陥を特定するための処理の一例を表したフローチャートである。

[図6]情報処理装置の撮影位置特定処理に係わる構成の一例を示す機能ブロック図である。

[図7]情報処理装置により実行される撮影位置特定処理の一例を表したフローチャートである。

[図8A]検査対象物に対して撮影位置の特定に必要なパラメタを説明するための図である。

[図8B]検査対象物の座標系を説明するための図である。

[図8C]撮影の座標系を説明するための図である。

[図9]線減弱情報の例を説明するための図である。

[図10A]線源から照射される放射線の経路の設定を説明するための図である。

[図10B]ボクセルを通過する放射線の経路について説明するための図である。

[図11]情報処理装置の欠陥特定処理に係わる構成の一例を示す機能ブロック図である。

[図12]第1例示的实施形態の情報処理装置により実行される欠陥特定処理の一例を表したフローチャートである。

[図13]サブセット番号と投影データ番号との設定について説明するための図である。

[図14]第2例示的实施形態の情報処理装置により実行される欠陥特定処理の一例を表したフローチャートである。

[図15]散乱角度を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0020] 以下、図面を参照して本開示の例示的实施形態を詳細に説明する。なお、本例示的实施形態は本開示を限定するものではない。

[0021] まず、本例示的实施形態の欠陥特定システム1について、全体の構成の一

例について説明する。図1には、本例示的实施形態の欠陥特定システム1について全体の構成の一例を表したブロック図が示されている。図1に示すように本例示的实施形態の欠陥特定システム1は、情報処理装置10、検査対象物60、線源64、及び検出器68を備える。なお、図1では、1つの検出器68を図示しているが、欠陥特定システム1が備える検出器68の数は限定されない。例えば、放射線Rの照射方向毎に、検出器68を設けてもよい。また、複数の検出器68を並べて配置し、複数の検出器68から1つの投影データが得られる形態としてもよい。

[0022] 本例示的实施形態の情報処理装置10は、線源64から検査対象物60に対して異なる方向から放射線Rを照射して検出器68により得られた少なくとも2つの投影データを用いて検査対象物60の欠陥61を特定する。一例として、本例示的实施形態の情報処理装置10が特定する欠陥61は、図2にも示すように、検査対象物60の内部に存在する。本例示的实施形態の情報処理装置10は、検査対象物60の内部の欠陥61について、3次元の位置等を特定する。なお、図2では、検査対象物60として、円柱状の形態を有する検査対象物を示しているが、検査対象物60の形状は、円柱状に限定されず、どのような形状であってもよい。

[0023] 具体的には、情報処理装置10は、検査対象物60に対して少なくとも2方向から放射線Rを照射して、検出器68により各々得られた実測データである投影データに対応する仮想的な仮投影データを、検査対象物60の減弱情報と形状情報とに基づいて生成する。そして、情報処理装置10は、実測データである投影データに対し、仮投影データが整合するように、検査対象物60の欠陥61について、3次元位置等を特定する。なお、以下では、単に「投影データ」という場合、検出器68により得られた実測データをいう。

[0024] ここで、減弱情報とは検査対象物60に欠陥が無い場合の、検査対象物60に含まれる部材の線減弱係数の情報のことをいう。線減弱係数とは、放射線Rが検査対象物60中で単位走行距離あたりに相互作用を行う確率であり

、放射線Rの強度、またはフォトン数の減少の割合である。線減弱係数は放射線のエネルギーに依存して変化する。線源64から照射される放射線Rは、エネルギー分布を有している。そのため、減弱情報は、検査対象物60に照射する放射線Rの少なくとも2つのエネルギー帯域における線減弱係数の情報を含むことが好ましい。

[0025] 投影データは、夫々の検出器68において入射する複数のエネルギー帯域の放射線Rのエネルギーの総和である。本例示的实施形態の情報処理装置10では、検査対象物60に照射する放射線Rの複数のエネルギー帯域における検査対象物60の線減弱係数の情報を活用することにより、詳細を後述する撮影位置の特定を高精度に行うことができる。また、情報処理装置10では、詳細を後述する欠陥比率断層像を精度良く生成することができる。その結果、本例示的实施形態の情報処理装置10によれば、欠陥61について、3次元位置も含めて精度良く特定することができる。

[0026] 放射線Rは、検査対象物60を通過する際に、光電効果、干渉性散乱（トムソン散乱）、非干渉性散乱（コンプトン散乱）、及び電子対生成といった検査対象物60との相互作用によって減弱すると共に、その減弱した内の一部を新たな放射線（散乱線）として生じる。

[0027] 検出器68は、線源64から照射され検査対象物60を通過した放射線R（以下、直接線と呼ぶ）と共に、上記の相互作用によって新たに発生した（散乱した）放射線も検出する。すなわち、検出器68により得られる投影データには、直接線によるデータに加えて、散乱線によるデータが含まれる。換言すると、検出器68により得られる投影データは、散乱線の影響を受ける。そのため、投影データに含まれる散乱線の影響を低減させるために、減弱情報は散乱情報を含むことが好ましい。散乱の発生確率や角度は理論的に計算することができ、例えばコンプトン散乱についてはクライナー仁科の公式（Klein-Nishinaモデル）によって計算することができる。しかしながら、その散乱の発生確率や角度は検査対象物60に含まれる部材の種類等により異なる。そのため、減弱情報は、検査対象物60に含まれる

夫々の部材の散乱情報を含む事が好ましい。

[0028] また、散乱の発生確率や角度は、照射される放射線Rのエネルギーにも依存して変化する。そのため、減弱情報は、少なくとも2つのエネルギー帯域における散乱情報を含むことが好ましい。コンプトン散乱は、散乱角度によって散乱後のエネルギーが変わるが、そのようにエネルギーが変わった後に更に散乱する多重散乱（2回目の散乱、3回目の散乱、・・・）の計算ができるためにも減弱情報は少なくとも2つのエネルギー帯域における散乱情報を含むことが好ましい。検査対象物60の散乱情報を活用することにより、情報処理装置10は、詳細を後述する撮影位置の特定を高精度に行うことができる、また、情報処理装置10は、詳細を後述する欠陥比率断層像を正確に生成することができる。その結果、本例示的实施形態の情報処理装置10によれば、欠陥61について、3次元位置も含めて精度良く特定することができる。

[0029] 形状情報とは、検査対象物60に欠陥61が無い場合の、検査対象物60に含まれる夫々の部材の3次元空間における分布の情報のことをいう。尚、検査対象物60の全体を内包する任意の領域を設定し、その領域を検査対象物60としてもよい。この場合、元の検査対象物60を内包するように設定した領域の内部には、元の検査対象物60には含まれない部分がある。この部分には元の検査対象物60が存在する環境に応じた物質が存在する。そこで、元の検査対象物60を内包する領域を設定して検査対象物60とする場合には、検査対象物60の部材として、元の検査対象物60が存在する環境に応じた物質を含めると共に、その物質の3次元空間における分布の情報も形状情報に含めればよい。元の検査対象物60の周囲には一般的には空気が存在するため、検査対象物60の部材として空気を含め、形状情報に空気の3次元空間における分布の情報も含めればよい。例えば、図3に示す様に、検査対象物60の全体を内包する任意の直方体62を設定し、設定した直方体62を検査対象物60としてもよく、この場合、検査対象物60の部材に空気を含めると共に、形状情報に空気の3次元空間における分布の情報も含

めればよい。本例示的实施形態では、図3に示す様に、検査対象物60を含む直方体62を設定し、設定した直方体62を検査対象物60として、欠陥の特定を行うこととする。

[0030] 減弱情報と形状情報の組合せによって、検査対象物60の3次元的な（少なくとも2つのエネルギー帯域における）線減弱係数の分布、（及び少なくとも2つのエネルギー帯域における散乱確率の分布）の情報が得られる。なお、本例示的实施形態では、詳細を後述する撮影位置の特定、及び欠陥比率断層像の生成において、検査対象物60の3次元的な線減弱係数（及び散乱確率）の分布の情報をを用いるが、この3次元的な線減弱係数（及び散乱確率）の分布の情報を得ることができる限り、減弱情報と形状情報は何れの形態の情報でも良い。例えば、3次元的な線減弱係数（及び散乱確率）の分布の情報でもよい。

[0031] 本例示的实施形態では、更に、検査対象物60に欠陥61が有る場合の、欠陥61の線減弱係数の情報を活用することができる。この場合、欠陥61の線減弱係数の情報は、検査対象物60に照射する放射線Rの少なくとも2つのエネルギー帯域における線減弱係数の情報を含むことが好ましい。（少なくとも2つのエネルギー帯域における）欠陥の線減弱係数の情報を活用することにより、詳細を後述する欠陥比率断層像を高精度に生成することができる。その結果、本例示的实施形態の情報処理装置10によれば、欠陥61について、3次元位置も含めて精度良く特定することができる。

[0032] 以下、詳細に本例示的实施形態の欠陥特定システム1の情報処理装置10による検査対象物60の欠陥61の特定について、例示的实施形態毎に詳細に説明する。

[0033] [第1例示的实施形態]

（情報処理装置の構成）

まず、本例示的实施形態の情報処理装置10のハードウェア構成について説明する。図4には、本例示的实施形態の情報処理装置10のハードウェア構成の一例を表したブロック図が示されている。図4に示すように、情報処

理装置 10 は、CPU (Central Processing Unit) 等のプロセッサ 20、メモリ 22、I/F (InterFace) 部 23、記憶部 24、ディスプレイ 26、及び入力装置 28 を備える。プロセッサ 20、メモリ 22、I/F 部 23、記憶部 24、ディスプレイ 26、及び入力装置 28 は、システムバスやコントロールバス等のバス 29 を介して相互に各種情報の授受が可能に接続されている。

[0034] プロセッサ 20 は、記憶部 24 に記憶された撮影位置特定プログラム 30 及び欠陥特定プログラム 32 を含む各種のプログラムをメモリ 22 へ読み出し、読み出したプログラムにしたがった処理を実行する。これにより、プロセッサ 20 は、欠陥 61 の特定に関する制御を行う。メモリ 22 は、プロセッサ 20 が処理を実行するためのワークメモリである。

[0035] プロセッサ 20 において実行される撮影位置特定プログラム 30 及び欠陥特定プログラム 32 は、記憶部 24 に記憶される。記憶部 24 の具体例としては、HDD (Hard Disk Drive) やSSD (Solid State Drive) 等が挙げられる。

[0036] I/F 部 23 は、無線通信または有線通信により、検出器 68 との間で各種情報の通信を行う。ディスプレイ 26 及び入力装置 28 はユーザインタフェースとして機能する。ディスプレイ 26 は、ユーザに対して、サンプルの分析に関する各種の情報を提供する。ディスプレイ 26 は特に限定されるものではなく、液晶モニタ及びLED (Light Emitting Diode) モニタ等が挙げられる。また、入力装置 28 は、欠陥 61 の特定に関する各種の指示を入力するためにユーザによって操作される。入力装置 28 は特に限定されるものではなく、例えば、キーボード、タッチペン、及びマウス等が挙げられる。なお、情報処理装置 10 では、ディスプレイ 26 と入力装置 28 とを一体化したタッチパネルディスプレイを採用している。

[0037] (処理全体の概要)

次に、本例示的实施形態の情報処理装置 10 により、検査対象物 60 の欠陥 61 を特定するための処理全体の流れについて説明する。図 5 には、情報

処理装置 10 により実行される検査対象物 60 の欠陥 61 を特定するための処理の一例を表したフローチャートが示されている。なお、図 5 に示した処理は、例えば、ユーザが入力装置 28 により入力された欠陥検出指示を受け付けた場合に、実行される。

[0038] 図 5 のステップ S 10 でプロセッサ 20 は、詳細を後述する撮影位置特定処理を実行し、撮影位置を特定する。なお、本例示的实施形態において、撮影位置とは、撮影の座標系の位置、及び姿勢のことをいう。すなわち、撮影位置とは、検査対象物 60 に対する線源 64 の位置（3次元位置）、及び放射線 R の照射方向のことをいう。本例示的实施形態では、撮影位置が不明なため、まず、ステップ S 10 において、撮影位置の特定を行う。なお、撮影位置が既知である場合は、ステップ S 10 の処理を省略することができる。

[0039] 次のステップ S 12 でプロセッサ 20 は、詳細を後述する欠陥特定処理を実行し、欠陥 61 を特定する。

[0040] このように、本例示的实施形態の情報処理装置 10 では、撮影位置特定処理と、欠陥特定処理との 2 つのステップにより、欠陥 61 の特定を行う。以下、各処理の詳細について説明する。

[0041] （撮影位置特定処理）

上述の撮影位置特定処理について説明する。

[0042] まず、撮影位置特定処理に係る情報処理装置 10 の構成について説明する。図 6 には、撮影位置特定処理に係る情報処理装置 10 の構成の一例を表す機能ブロック図が示されている。図 6 に示すように、情報処理装置 10 は、第 1 取得部 40、及び撮影位置特定部 42 を含む。プロセッサ 20 が撮影位置特定プログラム 30 を実行することにより、プロセッサ 20 が第 1 取得部 40 及び撮影位置特定部 42 として機能する。

[0043] 第 1 取得部 40 は、線源 64 から検査対象物 60 に対して異なる方向から放射線 R を照射させて検出器 68 により得られた複数の投影データを取得する機能を有する。一例として本例示的实施形態の情報処理装置 10 では、検査対象物 60 の撮影後、任意のタイミングで検出器 68 から放射線 R の照射

方向が異なる複数の投影データを取得し、記憶部 24 に記憶させる。また、第 1 取得部 40 は、撮影位置特定処理を実施する際に、記憶部 24 に記憶されている放射線 R の照射方向が異なる複数の投影データを取得し、撮影位置特定部 42 に出力する。

[0044] 図 6 に示すように撮影位置特定部 42 は、第 1 仮投影データ生成部 44 を含む。第 1 仮投影データ生成部 44 は、検査対象物 60 の減弱情報と形状情報とに基づいて、検査対象物 60 に放射線 R を照射した場合に得られる仮投影データを生成する機能を有する。換言すると、第 1 仮投影データ生成部 44 は、検査対象物 60 の減弱情報と形状情報とに基づくシミュレーションにより、第 1 取得部 40 が取得した複数の投影データの夫々に対応して、検査対象物 60 の仮想的な仮投影データを生成する。また、第 1 仮投影データ生成部 44 は、シミュレーションにおいて用いる撮影位置（以下、仮撮影位置という）を異ならせて、仮撮影位置毎に、仮投影データを生成する。

[0045] 撮影位置特定部 42 は、第 1 取得部 40 が取得した複数の投影データと、夫々に対応して第 1 仮投影データ生成部 44 が生成した複数の仮投影データとに基づいて、夫々の投影データの撮影位置を特定する機能を有する。具体的には、撮影位置特定部 42 は、複数の投影データの夫々に対して、仮投影データと投影データとの類似度が閾値よりも高い場合の、仮投影データに対応する仮撮影位置を、実際の撮影位置として特定する。

[0046] 次に、本例示的实施形態の情報処理装置 10 による撮影位置特定処理に関する作用について詳細に説明する。図 7 には、本例示的实施形態の情報処理装置 10 で実行される撮影位置特定処理の一例を表すフローチャートが示されている。

[0047] 図 7 のステップ S100 で第 1 取得部 40 は、上述したように、記憶部 24 から複数の投影データを取得し、撮影位置特定部 42 に出力する。

[0048] 次のステップ S102 で撮影位置特定部 42 は、初期の仮撮影位置を設定する。

[0049] ここで、検査対象物 60 に対して撮影位置の特定に必要なパラメタを考え

る（図8A参照）。図8Bに示すように検査対象物60の座標系を設定し、図8Cに示すように、撮影の座標系を設定する。なお、本例示的实施形態では、投影データが、図8A～8Cに示すように、コーンビーム方式で撮影された投影データである場合について説明するが、その他の任意のスキャン方式で撮影された投影データであってもよい。例えば、ペンシルビーム方式やファンビーム方式で撮影された投影データであってもよい。

[0050] まず、図8Bの検査対象物60の座標系をx軸、y軸、z軸の方向にそれぞれ、 Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p ほど平行移動させることにより、その座標系の原点を図8Cに示した線源64の位置に一致させることができる。すなわち、撮影系の任意の位置（図8Cの撮影の座標系の任意の位置）は、図8Bの検査対象物60の座標系を Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p ほど平行移動させることにより表すことができる。

[0051] 次に、撮影系の任意の姿勢（図8Cの撮影の座標系の任意の姿勢）は、平行移動させた後の図8Bの検査対象物60の座標系を、x軸、y軸、z軸の周りにそれぞれ、角度 θ_{x_p} 、 θ_{y_p} 、 θ_{z_p} だけ回転させることにより表すことができる。正確に言うと、撮影系の任意の姿勢は、3つの軸の周りの回転の順番も考慮して、まずz軸の周りに角度 θ_{z_p} ほど回転させ、次に（z軸の周りに回転させた座標系の）y軸の周りに角度 θ_{y_p} ほど回転させ、最後に（y軸の周りに回転させた座標系の）x軸の周りに角度 θ_{x_p} だけ回転させることにより表すことができる。

[0052] このように、検査対象物60に対して、撮影系の3次元位置及び姿勢は、平行移動量 Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p と、回転の角度 θ_{x_p} 、 θ_{y_p} 、 θ_{z_p} という、6つのパラメタで決定することができる。撮影位置を表す、これら6つのパラメタを未知数として、初期の仮撮影位置を設定する。例えば、回転角度 θ_{x_p} 、 θ_{y_p} 、 θ_{z_p} を全て「0」とし、また平行移動量 Δx_p 、 Δy_p も「0」とし、平行移動量 Δz_p のみを基準値に設定してもよい。なお、ここでは線源64から検出器68までの距離 D_{sd_p} （図8C参照）を既知としたが、距離 D_{sd_p} も含めた7つのパラメタを未知数としてもよい。この場合、距

離D_sd_pの初期値も基準値に設定すればよい。

- [0053] なお、本例示的实施形態では、処理の便宜上、検査対象物60の座標系は固定し、複数の投影データ各々における撮影の座標系の位置及び姿勢を平行移動や回転により表す。
- [0054] 次のステップS104で第1仮投影データ生成部44は、仮投影データを生成する。具体的には、第1仮投影データ生成部44は、設定された仮撮影位置の条件下で、検査対象物60の減弱情報と形状情報とに基づくシミュレーションによって仮投影データを生成する。
- [0055] まず、第1仮投影データ生成部44は、検査対象物60の減弱情報と形状情報とに基づき、検査対象物60の3次元的な線減弱係数の分布を得る。上述した通り、この3次元的な線減弱係数の分布を得ることができる限り、減弱情報と形状情報とは何れの形態の情報でもよく、例えば、3次元的な線減弱係数の分布そのものでもよい。本例示的实施形態では、減弱情報を $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ 、形状情報を $\text{no}_f(\text{no}_{\text{pix}})$ として、減弱情報 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ と形状情報 $\text{no}_f(\text{no}_{\text{pix}})$ との組合せにより検査対象物60の3次元的な線減弱係数の分布を表すこととする。ここで「no_f」は検査対象物60に含まれる部材の識別番号を表し、識別番号がno_fの部材を「部材no_f」と表記する。また、「no_e」は放射線Rのエネルギー（波長に相当）の識別番号を表し、識別番号がno_eのエネルギーを「エネルギーno_e」と表記する。また、減弱情報 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ は部材no_fについて、放射線Rのエネルギーno_eにおける線減弱係数を表す。一方、形状情報 $\text{no}_f(\text{no}_{\text{pix}})$ はボクセルno_pixにおける部材no_fを表す。検査対象物60の全ボクセル数を $\text{num}_{\text{pix}_t}$ とし、ボクセルno_pixは、 $1 \sim \text{num}_{\text{pix}_t}$ の何れかの値である。本例示的实施形態では、上述したように、検査対象物60を直方体としている（図3参照）。そこで、検査対象物60について、直方体の領域内を細かい格子（ボクセル）で構成し、各ボクセルに番号 $1 \sim \text{num}_{\text{pix}_t}$ をそれぞれ付与することとする。なお、本来は、各ボクセルの位置は、x、y、z座標の3次元で与えられるが、次元が多くなると参照が複雑になるため、本例示的实施形態では1次元の番号を各ボクセル

に付与している。

[0056] 図9には、線減弱係数 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ の例が示されている。図9には、3本のグラフが

載っているが、線減弱係数の小さい方からそれぞれ空気、アルミニウム、及び鉄の線減弱係数が示されている。なお、この線減弱係数の値は“Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, NIST, J.H. Hubbell and S.M. Seltzer.”に依るものである。

[0057] 空気、アルミニウム、及び鉄、それぞれの部材番号 no_f を1、2、3で表すこととする。検査対象物60の各ボクセルの部材はこれら3つの何れかとする。なお、空気については、全エネルギーにおいて、線減弱係数の値を近似的に0.0としてもよい。換言すると、全エネルギーにおいて線減弱係数の値が0.0の部材 no_f を空気と見做す。

[0058] 次に、図10Aに示すように、放射線Rの経路70を設定する。図10Aに示すように、線源64は点ではなく空間的に広がりをもつ。つまり、放射線Rの線量を確保するために、すなわち投影データの明るさや濃淡差を確保するために、線源64はある程度の大きさになる。そして線源64の広がりによって投影データにはボケが発生する。このようなボケを含んだ投影データを正確にシミュレートして仮投影データを生成するために、線源64の空間的な広がりを前提に放射線Rの経路70を設定することが好ましい。図10Aでは、3次元の空間に広がる予め定められた領域（線源64）内に3次元の予め定められた間隔で複数（図10Aでは、28個）の線源64Sを設定し、それぞれの線源64Sから放射線Rの経路70を設定している。

[0059] 図10Aに示すように、線源64から直交する2つの方向に微小な角度の等間隔で放射線Rの経路70を設定する。第1仮投影データ生成部44は、それぞれの経路70について、図10Bに示すように、通過するボクセル74を特定する。図10Bに示した例では、経路70は、4つのボクセル74

を通過している。各ボクセル74について、線減弱係数と通過する経路長Lに基づき線源64Sから放射された放射線Rの強度を減弱させて検出器68に入射する強度を求める。さらに、第1仮投影データ生成部44は、それぞれの経路70の放射線Rの検出器68に入射する強度を検出器68毎に積算して仮投影データを生成する。なお、図10Bでは、3次元空間における放射線Rの経路70、及び3次元のボクセル74を簡易的に2次元で表している。図10Aでは、2つの方向の角度をそれぞれ θ 、 ϕ として任意の方向をその組合せ(θ 、 ϕ)で表し、それぞれの微小な角度を $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$ とした場合に、それぞれの経路70を以下の方向に設定している。

\dots 、 $(-\Delta\theta, -2 \times \Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 $(-\Delta\theta, -\Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 $(-\Delta\theta, 0)$ 、 $(-\Delta\theta, +\Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 $(-\Delta\theta, +2 \times \Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 \dots
 \dots 、 $(0, -2 \times \Delta\phi)$ 、 $(0, -\Delta\phi)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(0, +\Delta\phi)$ 、 $(0, +2 \times \Delta\phi)$ 、 \dots
 \dots 、 $(+\Delta\theta, -2 \times \Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 $(+\Delta\theta, -\Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 $(+\Delta\theta, 0)$ 、 $(+\Delta\theta, +\Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 $(+\Delta\theta, +2 \times \Delta\phi / \cos(\Delta\theta))$ 、 \dots

[0060] 尚、夫々の経路70を中心とする微小な立体角の範囲を等しくするため、上式において、角度 θ における微小な角度 $\Delta\phi$ を $\Delta\phi / \cos(\theta)$ に補正している(θ の範囲を -90 度 $\sim +90$ 度として、 θ の絶対値が大きい程、 $\Delta\phi$ を大きくする様に補正している)。図10Aにおいて、経路70を多く、換言すると角度 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$ を小さく設定するほど、仮投影データを高精度にシミュレートすることができるが、計算時間はかかる。各経路70の放射線Rの検出器68に入射する強度Iは下記(1)式で求められる。

$$I = (e(1) \times I_e(1)) + (e(2) \times I_e(2)) + \dots + (e(\text{num}_e) \times I_e(\text{num}_e)) \quad \dots$$

\dots (1)

[0061] 上記（１）式において、 $e(1)$ 、 $e(2) \cdots e(\text{num_e})$ はエネルギーを示し、既知である。（１）式に示すようにに、強度 I は検出器に入射する num_e 種類のエネルギーの光子のエネルギーの合計となる。

[0062] 上記（１）式においエネルギー $e(\text{no_e})$ における放射線 R の強度 $I_e(\text{no_e})$ は、下記の（２）式により求まる。

$$I_e(\text{no_e}) = I0_e(\text{no_e}) \times \exp(-\{f(\text{no_f}(\text{no_pix}(1)), \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(1) + (f(\text{no_f}(\text{no_pix}(2)), \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(2)) + \cdots + (f(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{num_pix})), \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{num_pix}))\}) \quad \cdots (2)$$

[0063] 上記（２）式は、線源 $64S$ から放射されるエネルギー $e(\text{no_e})$ における強度 $I0_e(\text{no_e})$ の放射線 R が各ボクセル 74 を減弱しながら通過して検出器 68 に入射する強度 $I_e(\text{no_e})$ を表している。

[0064] 上記（２）式において、 $f(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_pix_path})), \text{no_e})$ が、経路 70 の通過する no_pix_path 番目のボクセル no_pix における部材 no_f のエネルギー no_e における線減弱係数 f を表し、 $\text{plen_pix}(\text{no_pix_path})$ が、経路 70 の通過する no_pix_path 番目のボクセル no_pix における経路長 plen_pix を表している。

[0065] 上記（２）式における強度 $I0_e(\text{no_e})$ は、図 $10A$ の各経路 70 について、経路 70 を中心として２つの方向の微小な角度範囲 $-\Delta\theta/2 \sim +\Delta\theta/2$ 、 $-\Delta\phi/\cos(\theta)/2 \sim +\Delta\phi/\cos(\theta)/2$ （夫々の経路 70 についての立体角が等しくなる範囲）において単位時間あたりの放射される（エネルギー $e(\text{no_e})$ の）光子数の総和を表す。つまり、図 $10A$ の経路 70 の角度の間隔を狭く、換言すると経路 70 を多く設定するほど、強度 $I0_e(\text{no_e})$ を小さな値に設定することになる。 $I0_e(0)$ 、 $I0_e(1)$ 、 \cdots 、 $I0_e(\text{num_e})$ は、線源 64 によって決まり、既知である。

[0066] 各経路 70 の放射線 R について上記（１）式により検出器 68 に入射する強度を求め、検出器 68 毎に積算することにより、第 1 仮投影データ生成部 44 は、仮投影データを生成することができる。なお、各経路 70 が入射す

る検出器68は図8Cに示した撮影の座標系において簡単に求めることができ、各経路70が通過するボクセル74、及びそのボクセル74における経路長Lは、各経路70について、図8Bの検査対象物60の座標系における経路70の方向及び起点となる線源64Sの位置を求めることにより簡単に求めることができる。各経路70について、図8Bの検査対象物60の座標系における経路70の方向は、図8Cの撮影の座標系における経路70の方向を回転の角度 θ_{x_p} 、 θ_{y_p} 、 θ_{z_p} に基づき逆回転させて求めることができる。また、図8Bの検査対象物60の座標系における経路70の起点となる線源64Sの位置は、図8Cの撮影の座標系における線源64Sの位置を回転の角度 θ_{x_p} 、 θ_{y_p} 、 θ_{z_p} に基づき逆回転させた上で、 Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p だけ平行移動させて求めることができる。

[0067] このようにして、第1仮投影データ生成部44は、仮投影データを生成する。仮投影データは、欠陥61が無い検査対象物60の投影データをシミュレーションしたデータである。なお、コーンビーム方式の場合、検出器68は2次元に配置されている。従って第1仮投影データ生成部44が生成する仮投影データは、2次元のデータである。

[0068] 次のステップS106で撮影位置特定部42は、実測の投影データと、仮投影データとの類似度を算出する。上述したように、仮投影データは欠陥61が無い検査対象物60の投影データをシミュレートしたものである。一方で、実測の投影データの検査対象物60には、欠陥61が含まれる場合がある。欠陥61が含まれる場合、投影データと仮投影データとは完全には一致しない。しかしながら、欠陥61が含まれる場合でも、その占める領域は検査対象物60の僅か一部であり、両者の投影データ全体の類似度への影響は僅かである。それよりも、実測とシミュレーションの撮影位置の違いの方が、両者の投影データの類似度に及ぼす影響が大きい。従って、投影データと仮投影データとの類似度を閾値よりも大きくすることにより、実測とシミュレーションの撮影位置を一致させることができる。2つのデータの類似度の指標（類似性の度合いを表す指標）としては、種々の公知の指標が知られて

いる。例えば、類似度の指標としては、差分二乗和 (Sum of Squared Difference (SSD))、差分絶対値和 (Sum of Absolute Difference (SAD))、正規化相互相関 (Normalized Cross-Correlation (NCC))、ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation)、画像均一度比 (Ratio image Uniformity)、相互情報量 (Mutual Information) 等が知られている。公知の何れの類似度の指標を使用してもよい。

[0069] なお、特にコーンビーム方式の場合、投影データには線源64から放射され検査対象物60を通過して減弱した直接線のみでなく、直接線が減弱する際に、その減弱した内の一部が新たな放射線として発生した散乱線も含まれる。従って、上記ステップS104で散乱線もシミュレートした仮投影データを生成し、投影データと散乱線を考慮した仮投影データとの類似度を算出することが好ましい。しかしながら、散乱の計算は計算量が多く時間が掛かるため、撮影位置特定処理においては散乱線のシミュレーションはせずに、単純に実測の投影データから、データに含まれる空間周波数成分のうち、低周波な成分を除外し、また仮投影データからも同様に低周波成分を除外した上で両者の類似度を算出してもよい。投影データにおいて散乱線による像は空間的に低周波で変化する像として付加されるため、投影データに含まれる空間周波数成分のうち、低周波成分を除外することにより散乱線による像を好適に除外することができる。また、低周波成分を除外しても、類似度への寄与が大きいエッジ(検査対象物60と背景の境界や、検査対象物60の内部の境界等、投影データの値が空間的に急激に変化する部分)を残すことができる。投影データの低周波成分の除外は、投影データをフーリエ変換により周波数領域のデータに変換し、散乱線の影響が大きい低周波成分をカットし、逆フーリエ変換により元の投影データに戻すことにより実施することができる。または、フーリエ変換せずとも、換言すると周波数領域のデータに変換せずとも、中周波～高周波成分の透過フィルタを投影データに畳み込むことによっても実施することができる。

[0070] このようにして導出した類似度が上述した閾値以下(類似度 \leq 閾値)の場

合、ステップS 1 0 8の判定が否定判定となり、ステップS 1 1 0へ移行する。この場合は、設定されている仮撮影位置が、実際の撮影位置として適切ではない場合である。

[0071] ステップS 1 1 0で撮影位置特定部4 2は、設定してある仮撮影位置を更新する。具体的には、撮影位置特定部4 2は、仮撮影位置を表す、平行移動量 Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p と回転の角度 θ_x_p 、 θ_y_p 、 θ_z_p という6つのパラメタを更新する。なお、線源6 4 Sから検出器6 8までの距離 D_{sd_p} も未知の場合、それも含めた7つのパラメタを更新する。ステップS 1 1 0の処理が終了すると、ステップS 1 0 4に戻り、ステップS 1 0 4～S 1 0 8の処理を繰り返す。

[0072] 一方、ステップS 1 0 8において、類似度が閾値よりも大きい場合、判定が肯定判定となり、ステップS 1 1 2へ移行する。

[0073] ステップS 1 1 2で撮影位置特定部4 2は、設定してある仮撮影位置を実際の撮影位置として特定する。ステップS 1 1 2の処理が終了すると、図7に示した撮影位置特定処理が終了する。

[0074] このように、未知のパラメタを更新しながら評価値（本例示的实施形態では類似度）を算出することを繰り返して、評価値が最小または最大（本例示的实施形態では最大）になるパラメタを探索する手法は最適化アルゴリズムや探索アルゴリズム等と呼ばれ、種々の公知の手法が知られている。公知の何れの手法を用いて6つ（または7つ）のパラメタを更新してもよい。例えば、勾配法により更新する場合、まず6つ（または7つ）のパラメタをそれぞれ微小量だけ増加させて投影データと仮投影データとの類似度を算出して、増加させる前の類似度との差分（変化量）を求める。各パラメタについて、このようにして求めた類似度の変化量の、パラメタの微小量の増加に対する比は傾き（偏微分）に相当する。次に、類似度の各パラメタについての傾き（偏微分）に基づき、類似度が増加する方向に夫々のパラメタを更新する。なお、平行移動及び距離のパラメタと回転のパラメタとでは単位が異なるため、更新のステップ幅を変えてもよい。勾配法により更新する場合、局所解

に収束する可能性がある。その可能性を無くすために、まず各パラメタについて、とり得る範囲において予め定められた数の候補値を設定し、各パラメタの候補値の全ての組合せについて類似度を算出して類似度が最大となる組合せを求め、その組合せを初期値として勾配法により類似度が閾値より大きいパラメタを求めてもよい。他の最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムにより類似度が閾値より大きいパラメタを求めてもよい。また、他の何れの最適化アルゴリズムにより類似度が閾値より大きいパラメタを求めてもよい。

- [0075] 放射線Rの照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置の各々に対応する各投影データについて撮影位置特定処理（図7参照）により撮影位置を特定する。各投影データの撮影位置の関係が既知の場合、つまり各投影データの撮影の座標系の位置及び姿勢の関係が既知の場合、検査対象物60の座標系に対して一つの投影データの撮影位置のみを撮影位置特定処理により特定すればよい。具体的には撮影位置特定処理において、一つの投影データの撮影位置の初期値を設定して、投影データと仮投影データとの類似度を算出して、仮撮影位置を更新することを繰り返して、類似度が閾値より大きい仮撮影位置を求めればよい。この場合、検査対象物60に対して一つの投影データの撮影位置（平行移動量 Δx_p 、 Δy_p 、 Δz_p と回転角度 θ_{x_p} 、 θ_{y_p} 、 θ_{z_p} の6つのパラメタ）を設定すれば、その一つの投影データの撮影位置と他の全ての投影データの撮影位置との関係は既知であるため、他の全ての投影データの撮影位置（6つのパラメタ）が決まる。従って、撮影位置特定処理のステップS104では、全ての方向の投影データに対応する仮投影データを生成することとする。そしてステップS106では、全ての方向の投影データと仮投影データとの類似度の総和を算出することとする。そしてステップS110では、全ての方向の投影データと仮投影データとの類似度の総和が増加する方向に仮撮影位置（パラメタ）を更新することとする。その結果、撮影位置特定処理によって、全ての方向の投影データと仮投影データとの類似度の総和が閾値より大きいパラメタを求めることとする。

[0076] 一方、各投影データの撮影位置の関係が未知の場合は、各投影データについて上述の撮影位置特定処理（図7参照）により、投影データと仮投影データとの類似度が閾値より大きいパラメタ（6つまたは7つ）を求めればよい。

[0077] 以上、説明した撮影位置特定処理により、放射線Rの照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置の各々に対応する各投影データについて撮影位置を特定することができる。

[0078] （欠陥特定処理）

上述の欠陥特定処理について説明する。なお、以下の説明では必要に応じて撮影位置特定処理において使用した変数名を別の変数として再定義する場合がある。

[0079] まず、欠陥特定処理に係る情報処理装置10の構成について説明する。図11には、欠陥特定処理に係る情報処理装置10の構成の一例を表す機能ブロック図が示されている。図11に示すように、情報処理装置10は、第2取得部50、及び欠陥特定部52を含む。プロセッサ20が欠陥特定プログラム32を実行することにより、プロセッサ20が第2取得部50及び欠陥特定部52として機能する。

[0080] 第2取得部50は、線源64から検査対象物60に対して異なる方向から放射線Rを照射させて検出器68により得られた複数の投影データを取得する機能を有する。本例示的实施形態では、上述したように撮影位置特定処理における情報処理装置10の第1取得部40が記憶部24に放射線Rの照射方向が異なる複数の投影データを記憶させる。そのため、第2取得部50は、記憶部24から放射線Rの照射方向が異なる複数の投影データを取得する。

[0081] 図11に示すように欠陥特定部52は、第2仮投影データ生成部54を含む。第2仮投影データ生成部54は、検査対象物60の減弱情報と形状情報とに基づいて、検査対象物60に放射線Rを照射した場合に得られる仮投影データを生成する機能を有する。なお、第2仮投影データ生成部54が生成

する仮投影データは、撮影位置特定処理において第1仮投影データ生成部44が生成する仮投影データと異なる。上述したように、第1仮投影データ生成部44が生成する仮投影データは、欠陥61を含まない検査対象物60の仮投影データである。一方、欠陥特定部52が生成する仮投影データは、欠陥61を想定した検査対象物60の仮投影データである。

[0082] 欠陥特定部52は、第2仮投影データ生成部54が生成した放射線Rの照射方向が異なる複数の仮投影データと、第2取得部50が取得した放射線Rの照射方向が異なる複数の投影データとに基づいて、欠陥61を特定する機能を有する。具体的には、欠陥特定部52は、仮投影データと投影データとの比較結果に基づいて、欠陥比率断層像を生成し、欠陥比率断層像に基づいて、欠陥61の3次元位置、大きさ、及び形状を特定する。

[0083] なお、本例示的实施形態では、検査対象物60に放射線Rを照射して取得される「投影データ」と対比して、検査対象物60内部の像を「断層像」と称しており、2次元の像も3次元の像も包括して「断層像」という。「欠陥比率断層像」は、欠陥61の比率を表す断層像であり、本例示的实施形態では、最大値を1.0とし、値が大きいほど、欠陥61である確率が高くなる。なお、本例示的实施形態では、欠陥比率断層像として欠陥比率の3次元像を生成するため、以下では、欠陥比率断層像のことを欠陥比率3次元像と言う場合がある。

[0084] 次に、本例示的实施形態の情報処理装置10による欠陥特定処理に関する作用について詳細に説明する。上述の撮影位置特定処理によって、検査対象物60に対して各投影データの撮影位置が特定されたため、線源64と検査対象物60と検出器68の幾何学的配置に基づき、欠陥特定処理において用いられる各種のテーブルを事前に生成する。図10Aに示したように、線源64Sから直交する2つの方向に微小な角度の等間隔で放射線Rの経路70を設定し、各経路70について入射する検出器68を特定する。上述したように、経路70を多く、換言すると角度 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$ を小さく設定するほど、欠陥比率3次元像の生成を高精度に行うことができるが、計算時間はかかる

。各検出器68について、検出器68に入射する経路70を抽出して経路70の数をテーブル化する。そして、各経路70について、通過するボクセル74を抽出し、抽出したボクセル74の数と、各ボクセル74の番号をテーブル化すると共に、各ボクセル74における経路長を求めてテーブル化する。なお、図10Aに示した複数の線源64Sの各々を区別してテーブル化する必要はなく、全ての線源64Sの経路70をまとめてテーブル化すればよい。

[0085] 例えば、以下のテーブルを生成しておく。

・テーブルnum_path(no_s, no_d) : スキャンno_sの検出器no_dに入射する経路70の数のテーブル。なお、「no_s」はスキャンの識別番号を表し、識別番号がno_sのスキャンを「スキャンno_s」と表記する。本例示的实施形態では、各方向の撮影をスキャンという。また、「no_d」は検出器68の識別番号を表し、識別番号がno_dの検出器68を「検出器no_d」と表記する。なお、上述したように本例示的实施形態の検出器68は2次元状に配置されているため、「no_d」は2次元配置における検出器68の識別番号を表している。

・テーブル num_pix(no_s, no_d, no_path) : スキャンno_sの検出器no_dに入射する経路no_pathの通過するボクセル74の数のテーブル。「no_path」は経路70の識別番号を表し、識別番号がno_pathの経路70を「経路no_path」と表記する。

・テーブルno_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path) : スキャンno_sの検出器no_dに入射する経路no_pathの通過する、no_pix_path番目のボクセル74の識別番号のテーブル。「no_pix_path」は、スキャンno_sの検出器no_dに入射する経路no_pathにおけるボクセル74の識別番号を表し、線源64に近い方から順に小さい番号を付与する。

・テーブルplen_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path) : スキャンno_sの検出器no_dに入射する経路no_pathの通過する、no_pix_path番目のボクセル74における経路長のテーブル。

[0086] また、全スキャンをいくつかの組（サブセット）に分割した各サブセット（詳細後述）について、サブセットに属する全てのスキャンの全ての検出器68に入射する全ての経路70の、各ボクセル74を通過する経路長の総和を求めてテーブル化しておく。

[0087] 例えば以下のテーブルを生成しておく。

・テーブル $\text{plen_pix_sub}(\text{no_sub}, \text{no_pix})$: サブセット no_sub に属する全てのスキャンの全ての検出器68に入射する全ての経路70のボクセル no_pix を通過する経路長の総和のテーブル。「 no_sub 」はサブセットの識別番号を表し、識別番号が no_sub のサブセットを、「サブセット no_sub 」と表記する。

[0088] また、本例示的实施形態では、欠陥61の線減弱係数を $f_{d_l}(\text{no_e})$ 及び $f_{d_h}(\text{no_e})$ として事前に定めておく。ここで「 no_e 」は放射線Rのエネルギーの帯域を示す識別番号を表し、「 $f_{d_l}(\text{no_e})$ 」は、線減弱係数の小さい欠陥について、放射線Rのエネルギー no_e における線減弱係数を表す。線減弱係数の小さい欠陥の線減弱係数 f_{d_l} は、検査対象物60に含まれる、空気を除く全ての部材の線減弱係数 f より全てのエネルギー no_e において小さいものとする。また、「 $f_{d_h}(\text{no_e})$ 」は、線減弱係数の大きい欠陥について、放射線Rのエネルギー no_e における線減弱係数を表す。線減弱係数の大きい欠陥の線減弱係数 f_{d_h} は、検査対象物60に含まれる、空気を除く全ての部材の線減弱係数 f より全てのエネルギー no_e において大きいものとする。

[0089] 検査対象物60に含まれる欠陥61としては例えばブローホール、溶け込み不良、融合不良、割れ、及び異物等があり、これらの欠陥61の多くは空気とみなすことができる。そこで線減弱係数の小さい欠陥には空気を設定することが好ましい。空気の線減弱係数 f_{d_l} は、検査対象物60に含まれる、空気を除く全ての部材の線減弱係数 f より全てのエネルギー no_e において小さい値に設定する。一方、線減弱係数の大きい欠陥には異物を設定することができる。異物の線減弱係数 f_{d_h} は、検査対象物60に含まれる、空気を除く全ての部材の線減弱係数 f より全てのエネルギー no_e において大きい値に

設定する。なお、異物の線減弱係数が未知の場合、換言すると異物の種類が未知の場合、異物の線減弱係数 f_{d_h} に仮想的な値を設定すればよい。

[0090] 図12には、本例示的实施形態の情報処理装置10で実行される欠陥特定処理の一例を表すフローチャートが示されている。図12に示すステップS200で第2取得部50は、上述したように、記憶部24から複数の投影データを取得し、欠陥特定部52に出力する。

[0091] 次のステップS202で、欠陥特定部52は、全方向（全スキャン）の投影データをいくつかの組（サブセット）に分割する。

[0092] 例えば、投影データの数（スキャンの数、投影方向の数）が8の場合、図13に示す例のようにサブセット番号と投影データ番号とを設定できる。図13に示す例のように、投影方向がなるべく逆方向に近い関係の投影データを同じサブセットに含めることが好ましい。また、投影方向がなるべく直交に近い関係の投影データを同じサブセットに含めることが好ましい。また、投影方向がなるべく直交に近い関係のサブセットの順番にサブセット番号を設定する（欠陥比率断層像を更新する（詳細後述））ことが好ましい。なお、図13の例では、全ての投影データの投影方向が一つの面内に収まり、また各投影データの投影方向（角度）を45度刻みとしているが、全ての投影データの投影方向が一つの面内に収まるとは限らず、また、各投影データの投影角度が等間隔とも限らない。図13の例では、上述した好ましいサブセットの分割の仕方や順番の決め方を分かり易く示すために、全ての投影データの投影方向が一つの面内に収まり、かつ、その面内における各投影データの投影角度を等間隔とした。本例示的实施形態では、検査対象物60に対して、各投影データの撮影系の位置及び姿勢を任意として実施が可能である。すなわち、検査対象物60の座標系を固定した場合の、各投影データの撮影系の図8Cに示した yz 平面、若しくは xz 平面は一致しなくてもよい。なお、通常のコーンビーム方式の場合、各投影データの yz 平面、若しくは xz 平面は一致する。

[0093] 図12に示した欠陥特定処理では、欠陥特定部52は、サブセットに属す

る投影データだけで欠陥比率断層像の更新を行い、それをサブセットごとに繰り返して、全てのサブセットでの更新を行った時点で全体の更新1回とする。欠陥特定部52は、全体の更新を予め定められた回数行った時点で欠陥比率断層像の生成を完了する。

[0094] そのため、ステップS204で欠陥特定部52は、初期の欠陥比率断層像を生成する（詳細後述）。次のステップS206で欠陥特定部52は、全体の更新回数 i を「1」に設定する。

[0095] 次のステップS208で欠陥特定部52は、サブセット番号 j を「1」に初期化する。サブセット番号 j の初期化は、更新回数 i 毎に行われる。次のステップS210で欠陥特定部52は、投影データ番号 k を「1」に初期化する。投影データ番号 k の初期化は、サブセット j 毎に行われる。

[0096] 次のステップS212で欠陥特定部52は、サブセット番号 j と投影データ番号 k の組合せに対応するスキャン番号の投影データ、及び仮投影データに基づき、欠陥比率断層像の各ボクセル74の欠陥比率を計算する（詳細後述）。

[0097] 次のステップS214で欠陥特定部52は、投影データ番号 k をインクリメント（ $k = k + 1$ ）する。次のステップS216で欠陥特定部52は、投影データ番号 k が、サブセット j に属する投影データの総数 N_k を超える（ $k > N_k$ ）か否かを判定する。投影データ番号 k が総数 N_k を超えるまで、ステップS216の判定が否定判定となり、ステップS212に戻り、欠陥比率断層像の各ボクセル74の欠陥比率の計算を繰り返す。一方、投影データ番号 k が総数 N_k を超えると、ステップS216の判定が肯定判定となり、ステップS218へ移行する。

[0098] ステップS218で欠陥特定部52は、上記ステップS212で計算した欠陥比率に基づき、欠陥比率断層像を更新する。

[0099] 次のステップS220で欠陥特定部52は、サブセット番号 j をインクリメント（ $j = j + 1$ ）する。次のステップS222で欠陥特定部52は、サブセット番号 j が、サブセットの総数 N_j を超える（ $j > N_j$ ）か否かを判

定する。サブセット番号 j が総数 N_j を超えるまで、ステップ S 2 2 2 の判定が否定判定となり、ステップ S 2 1 0 に戻り、欠陥比率断層像の更新を繰り返す。一方、サブセット番号 j が総数 N_j を超えると、ステップ S 2 2 2 の判定が肯定判定となり、ステップ S 2 2 4 へ移行する。

[0100] ステップ S 2 2 4 で欠陥特定部 5 2 は、更新回数 i をインクリメント ($i = i + 1$) する。次のステップ S 2 2 6 で欠陥特定部 5 2 は、更新回数 i が、予め定められた回数 N_i を超える ($i > N_i$) か否かを判定する。更新回数 i が予め定められた回数 N_i を超えるまで、ステップ S 2 2 6 の判定が否定判定となり、ステップ S 2 0 8 に戻り、欠陥比率断層像の更新を繰り返す。一方、更新回数 i が予め定められた回数 N_i を超えると、ステップ S 2 2 6 の判定が肯定判定となり、ステップ S 2 2 8 へ移行する。

[0101] 次のステップ S 2 2 8 で欠陥特定部 5 2 は、上記の処理により生成された欠陥比率断層像に基づいて、欠陥 6 1 の 3 次元位置、大きさ、及び形状を特定する (詳細後述)。また、欠陥特定部 5 2 は、特定結果をディスプレイ 2 6 に表示する。ステップ S 2 2 8 の処理が終了すると、図 1 2 に示した欠陥特定処理が終了する。

[0102] 以下、ステップ S 2 0 4、S 2 1 2、S 2 1 8 の各々について詳細を説明する。なお欠陥比率断層像の生成は、線減弱係数の小さい欠陥と大きい欠陥の夫々について行う。具体的には、撮影位置の定まった仮投影データ (減弱情報 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ と形状情報 $\text{no}_f(\text{no}_{\text{pix}})$ とから生成される欠陥 6 1 を含まない仮投影データ) と実測の投影データとを比較する。そして、実測の方が大きい投影データに基づいて線減弱係数の小さい欠陥 6 1 の欠陥比率断層像を生成し、また、実測の方が小さい投影データに基づいて線減弱係数の大きい欠陥 6 1 の欠陥比率断層像を生成する。つまり、線減弱係数の小さい欠陥 6 1 と大きい欠陥 6 1 の各々について上述した欠陥比率断層像の生成を実施する。なお、線減弱係数の小さい欠陥 6 1 の欠陥比率断層像の生成において、仮投影データより小さい実測の投影データについては、実測の投影データと仮投影データとの差分を「0」に置換える。具体的には、実測の投影データ

の値を仮投影データの値に置換える。また、線減弱係数の大きい欠陥61の欠陥比率断層像の生成においては、逆に、仮投影データより大きい実測の投影データについては、実測の投影データの値を仮投影データの値に置換える。すなわち、実測の投影データと仮投影データとの差分を「0」に置換える（詳細後述）。以下では、線減弱係数の小さい欠陥61の欠陥比率断層像の生成方法について詳細に説明し、線減弱係数の大きい欠陥61の欠陥比率断層像の生成方法については、説明が必要な場合のみ補足説明する。

[0103] ステップS204の詳細について説明する。ステップS204では、上述したように、初期の欠陥比率断層像 $r_d(\text{no_pix})$ を生成する。 $r_d(\text{no_pix})$ はボクセル no_pix に含まれる欠陥の比率を表し、0.0~1.0の値をとる。 $r_d(\text{no_pix})$ が0.0の場合、ボクセル no_pix には欠陥が含まれず、1.0の場合、ボクセル no_pix は欠陥61によって占められるとみなす。欠陥比率断層像のボクセル74の総数を num_pix_t として、 no_pix は1~ num_pix_t の何れかの値である。欠陥の各エネルギー no_e における線減弱係数は、事前に生成した欠陥61の線減弱係数テーブル $f_{d_l}(\text{no_e})$ により与えられる。欠陥比率断層像 $r_d(\text{no_pix})$ の初期値として、全ボクセル74の値を0.0に設定し、全ボクセル74に欠陥61が含まれない状態とする。

[0104] ステップS212の詳細について説明する。欠陥特定部52は、投影データ $g(\text{no_s}, 1) \sim g(\text{no_s}, \text{num_d})$ に基づき、欠陥比率断層像の欠陥比率を計算する。スキャン番号 no_s は、サブセット番号 j と投影データ番号 k との組合せに対応して決まる（図13参照）。「 num_d 」は検出器68の数を表す。

[0105] 検出器 no_d の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ に基づく計算方法を説明する。まず下記の(3)式により、現在の断層像に基づきスキャン no_s 、検出器 no_d の仮投影データ g_v を求める。

$$g_v = I(1) + I(2) + \dots + I(\text{num_path}(\text{no_s}, \text{no_d})) \quad \dots (3)$$

[0106] なお、上記(3)式における、 $\text{num_path}(\text{no_s}, \text{no_d})$ は事前に求めたスキ

キャンno_sの検出器no_dに入射する経路70の数である。

[0107] 上記(3)式においてI(no_path)は検出器に入射する経路no_pathの放射線の強度を表し、以下の(4)式で求まる。

$$I(\text{no_path}) = (e(1) \times I_e(1)) + (e(2) \times I_e(2)) + \dots + (e(\text{num_e}) \times I_e(\text{num_e})) \quad \dots (4)$$

[0108] 上記(4)式において、上述した通り、e(1)、e(2)、...、e(num_e)はエネルギーを示し、既知である。

[0109] 上記(4)式においてエネルギーe(no_e)における放射線Rの強度I_e(no_e)は下記の(5)式で求まる。

$$I_e(\text{no_e}) = I0_e(\text{no_e}) \times \exp(-\{(f_{\text{ext}}(1, \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, 1)) + (f_{\text{ext}}(2, \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, 2)) + \dots + (f_{\text{ext}}(\text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}), \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path})))\})$$

但し、

$$f_{\text{ext}}(\text{no_pix_path}, \text{no_e}) = f(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})), \text{no_e}) + \{r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) \times (f_d(\text{no_e}) - f(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})), \text{no_e}))\}$$

線減弱係数の小さい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d(\text{no_e}) = f_{dl}(\text{no_e})$

線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d(\text{no_e}) = f_{dh}(\text{no_e}) \quad \dots (5)$

[0110] 上記(5)式は、線源64から照射されるエネルギーe(no_e)における強度I0_e(no_e)の放射線Rが各ボクセル74を減弱しながら通過して検出器68に入射する強度I_e(no_e)を表している。

[0111] 上記(5)式においてf_ext(no_pix_path, no_e)は、スキャンno_sの検出器

no_dに入射する経路no_pathの通過するno_pix_path番目のボクセルno_pixにおけるエネルギーno_eの線減弱係数を表す。元の減弱情報f(no_f, no_e)と形状情報no_f(no_pix)による線減弱係数f(no_f(no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)), no_e)を比率 $1 - r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ 、欠陥の線減弱係数f_d_l(no_e)を比率 $r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ で足した線減弱係数をf_extとする。

[0112] 上述したように、上記(5)式における強度 $I_{0_e}(\text{no_e})$ は、図10Aの微小な角度範囲において単位時間あたりの照射される(エネルギーe(no_e)の)光子数の総和を表し、図10Aの経路70の角度の間隔を狭く、換言すると経路70を多く設定するほど、 $I_{0_e}(\text{no_e})$ を小さな値に設定することになる。 $I_{0_e}(0)$ 、 $I_{0_e}(1)$ 、 \dots 、 $I_{0_e}(\text{num_e})$ は、線源64によって決まり、既知である。

[0113] 上記(3)式により求めた仮投影データ g_v と、実測の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ を比較する。仮投影データ g_v の方が大きい場合、スキャンno_sの検出器no_dに入射する全ての経路について、通過する全てのボクセル(空気の部分を除く)における欠陥比率を Δr だけ減らして仮投影データ g_v を再度求めて実測の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ と比較する。このように、欠陥比率を Δr だけ減らして仮投影データ g_v を再計算して投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ と比較する処理を、仮投影データ g_v が実測の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ 以下になるまで繰り返す。そして実測の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ 以下になる直前の仮投影データ g_v と、実測の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ 以下になる仮投影データ g_v のうち、実測の投影データ $g(\text{no_s}, \text{no_d})$ に、より近い方の仮投影データ g_v を採用する。この仮投影データ g_v を計算する際の欠陥比率の減らした分を $dr_d(\text{no_s}, \text{no_d})$ として保存しておく。このとき、 $dr_d(\text{no_s}, \text{no_d})$ は、負の値である。欠陥比率を α だけ減らして仮投影データ g_v を再計算するには、上記(5)式において、 $f_ext(\text{no_pix_path}, \text{no_e})$ の $r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ の代わりに $r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) - \alpha$ とすればよい。そのようにして上記(5)式により強度 $I_{0_e}(\text{no_e})$

e)を再計算し、再計算した $I_e(1)$ 、 $I_e(2)$ 、 \dots 、 $I_e(\text{num}_e)$ から上記(4)式により強度 $I(\text{no_path})$ を再計算し、再計算した $I(1)$ 、 $I(2)$ 、 \dots 、 $I(\text{num_path}(\text{no}_s, \text{no}_d))$ から上記(3)式により仮投影データ g_v を再計算すればよい。

[0114] なお、上記(5)式の計算の際に、ボクセル $\text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, 1) \sim \text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, \text{num_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}))$ において、 $r_d(\text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) - \alpha$ が 0.0 より小さくなるボクセル74がある場合、そのボクセル74については欠陥比率 r_d を 0.0 とする。このように、線減弱係数 f_{ext} を、元の欠陥61を含まない線減弱係数 $f(\text{no}_f(\text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, \text{no_pix_path})), \text{no}_e)$ より大きな値にはしない。

[0115] 仮投影データ g_v の方が実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ より小さい場合は、逆に、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する全ての経路70について、通過する全てのボクセル74における欠陥比率を Δr だけ増やして仮投影データ g_v を再計算することを、仮投影データ g_v が実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以上になるまで繰り返す。そして実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以上になる直前の仮投影データ g_v と実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以上になる仮投影データ g_v のうち、実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ により近い方の仮投影データ g_v を採用する。この仮投影データ g_v を計算する際の欠陥比率の増やした分を $dr_d(\text{no}_s, \text{no}_d)$ として保存しておく。このとき、 $dr_d(\text{no}_s, \text{no}_d)$ は、正の値である。欠陥比率を増やす場合、増やした結果、欠陥比率が最大値 1.0 を超えてしまうボクセル74がある場合は、そのボクセル74については欠陥比率を 1.0 とする。

[0116] 以上の計算によって、投影データ $g(\text{no}_s, 1) \sim g(\text{no}_s, \text{num}_d)$ に基づき、欠陥比率の増分 $dr_d(\text{no}_s, 1) \sim dr_d(\text{no}_s, \text{num}_d)$ を求めることができる。

[0117] なお、実測の投影データ $g(\text{no}_s, 1) \sim g(\text{no}_s, \text{num}_d)$ において、元の減弱情報 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ と形状情報 $\text{no}_f(\text{no_pix})$ から上記(3)式、(4)式、及び欠陥比率 r_{ext}

dを0とした(5)式により求まる仮投影データ g_v 、すなわち欠陥を含まない場合の仮投影データ g_v より実測の投影データ g の方が小さいデータについては、予め、実測の投影データ g の値を、その仮投影データ g_v の値に置換えておく。例えば検出器 no_d の実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の値が、元の減弱情報 $f(no_f, no_e)$ と形状情報 $no_f(no_pix)$ から上記(3)式、(4)式、及び(5)式により求まる仮投影データ g_v より小さい場合には、この検出器68に入射する経路70の通過する各ボクセル74には、線減弱係数の小さい欠陥61が含まれないとみなす。そして、各ボクセル74の(線減弱係数の小さい欠陥の)欠陥比率 r_d を0.0にするために、予め、実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の値を仮投影データ g_v の値に置換えておく。この置換えによって、線減弱係数の小さい欠陥61の欠陥比率断層像の生成では、実測の投影データ $g(no_s, 1) \sim g(no_s, num_d)$ の値は、必ず、元の減弱情報 $f(no_f, no_e)$ と形状情報 $no_f(no_pix)$ から求まる欠陥61を含まない場合の仮投影データの値以上となる。置換えは、ステップS204(図12参照)の前に行えばよい。なお、線減弱係数の小さい欠陥61と、線減弱係数の大きい欠陥61の夫々の欠陥比率断層像の生成において置換えを行うため、置換える前の実測の投影データ $g(no_s, 1) \sim g(no_s, num_d)$ を別途保存しておく。

[0118] 線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成では、実測の投影データ $g(no_s, 1) \sim g(no_s, num_d)$ において、元の減弱情報 $f(no_f, no_e)$ と形状情報 $no_f(no_pix)$ から上記(3)式、(4)式、及び欠陥比率 r_d を0とした(5)式により求まる仮投影データ g_v 、すなわち欠陥を含まない場合の仮投影データ g_v より実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の方が大きいデータについては、予め、実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の値を、その仮投影データ g_v の値に置換えておく。例えば検出器 no_d の実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の値が、元の減弱情報 $f(no_f, no_e)$ と形状情報 $no_f(no_pix)$ から上記(3)式、(4)式、及び(5)式により求まる仮投影データ g_v より大きい場合には、この検出器68に入射する経路70の通過する各ボクセル74には線減弱係数の大きい欠陥61が含まれないとみなす。そして、各ボクセル74の(線

減弱係数の大きい欠陥61の)欠陥比率 r_d を0.0にするために、予め、実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ の値を仮投影データ g_v の値に置換えておく。この置換えによって、実測の投影データ $g(\text{no}_s, 1) \sim g(\text{no}_s, \text{num}_d)$ の値は、必ず、元の減弱情報 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ と形状情報 $\text{no}_f(\text{no}_\text{pix})$ から求まる欠陥61を含まない場合の仮投影データの値以下となる。

- [0119] 線減弱係数の大きい欠陥61の欠陥比率断層像の生成では、スキャン no_s の検出器 no_d について、まず現在の断層像に基づき上記(3)式、(4)、及び(5)式により仮投影データ g_v を求め、仮投影データ g_v の方が小さい場合には、この検出器68に入射する全ての経路70の通過する全てのボクセル74(空気を除く)の欠陥比率を Δr だけ減らして仮投影データ g_v を求める処理を仮投影データ g_v が実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以上になるまで繰り返し、実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以上になる直前の仮投影データ g_v と実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以上になる仮投影データ g_v のうち、実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ に、より近い方の仮投影データ g_v を採用する。その計算の際の欠陥比率の減らした分を $dr_d(\text{no}_s, \text{no}_d)$ として保存しておく。このとき、 $dr_d(\text{no}_s, \text{no}_d)$ は、負の値である。その際に、欠陥比率を減らした結果、最小値0.0より小さくなるボクセル74については欠陥比率を0.0とする。つまり、上記(5)式において線減弱係数 f_{ext} を、元の欠陥61を含まない線減弱係数 $f(\text{no}_f(\text{no}_\text{pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no}_\text{path}, \text{no}_\text{pix}_\text{path})), \text{no}_e)$ より小さな値にはしない。また、仮投影データ g_v の方が実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ より大きい場合は、逆に、欠陥比率を Δr だけ増やして仮投影データ g_v を求める処理を仮投影データ g_v が実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以下になるまで繰り返し、実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以下になる直前の仮投影データ g_v と実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ 以下になる仮投影データ g_v のうち、実測の投影データ $g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ に、より近い方の仮投影データ g_v を採用する。その計算の際の欠陥比率の増やした分を $dr_d(\text{no}_s, \text{no}_d)$ として保存しておく。このとき、 $dr_d(\text{no}_s, \text{no}_d)$ は、正の値である。その際に、欠陥比率を増やした結果、最大値1.0を超えてしまうボクセル74

については欠陥比率を1.0とする。

[0120] なお、線減弱係数の小さい欠陥61の欠陥比率断層像の生成においても、線減弱係数の大きい欠陥61の欠陥比率断層像の生成においても、ステップS204で生成した欠陥比率断層像 r_d において、ボクセル1～ num_pix_t のうち、空気の占めるボクセル74については、そのボクセル74に欠陥は発生し得ないため、欠陥比率を0.0に固定する。また、ステップS212で欠陥比率の増分 $dr_d(no_s, 1) \sim dr_d(no_s, num_d)$ を求める際にも、空気の占めるボクセル74については欠陥比率を0.0に固定する。

[0121] ステップS218の詳細について説明する。欠陥特定部52は、サブセットjに属する全ての投影データについて、欠陥比率の増分 $dr_d(no_s, 1) \sim dr_d(no_s, num_d)$ の計算が完了した後、その増分に基づき欠陥比率断層像を更新する。あるボクセル no_pix に着目し、このボクセル74をスキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路70が通過するものとする。この時、 $dr_d(no_s, no_d)$ は、ボクセル no_pix を通過するスキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路70における欠陥比率の増分の推定値である。従って、ボクセル no_pix を通過する全ての経路70における欠陥比率の増分の推定値を、各経路長で重み付けて平均値を求める必要がある。まず増分の平均値の欠陥比率断層像を $dr_d_ave(no_pix)$ として $dr_d_ave(no_pix)$ を全ボクセル74の値を「0」として初期化する。ここで、 $dr_d_ave(no_pix)$ はボクセル no_pix における欠陥比率の増分の平均値を表し、 no_pix は1～全ボクセル数 num_pix_t の何れかの値である。そしてサブセットjに属する全ての投影データについて欠陥比率の増分 $dr_d(no_s, 1) \sim dr_d(no_s, num_d)$ を dr_d_ave の各ボクセル74に経路長で重み付けて加算してゆく。そして、最後に dr_d_ave の各ボクセル74の値を、事前にテーブルを生成済みの各ボクセル74の経路長の総和 $plen_pix_sub$ で割ることにより各ボクセル74について増分の平均値を求めて、更新前の欠陥比率断層像に加算することにより欠陥比率断層像を更新する。

[0122] サブセットjに属するスキャン no_s の投影データを例に加算処理の内容を具体的に説明する。スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路 no_path が通過

するボクセル数は $\text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path})$ である。増分の平均値の断層像 dr_d_ave において、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路 no_path の通過する no_pix_path 番目のボクセル $\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})$ の値に、増分 \times 経路長、つまり $\text{dr_d}(\text{no_s}, \text{no_d}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})$ を加算する。同様に、増分の平均値の断層像 dr_d_ave において、経路 no_path が通過する $\text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path})$ 個の全部のボクセル 74 の値に、増分 $\text{dr_d}(\text{no_s}, \text{no_d}) \times$ 経路長 ($\text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, 1) \sim \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}))$) を夫々加算する。なお、ボクセル $\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, 1) \sim \text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}))$ において、更新前の欠陥比率に増分 $\text{dr_d}(\text{no_s}, \text{no_d})$ を加算した結果、欠陥比率の最大値 1.0 を超えてしまうボクセルがある場合は、そのボクセルについては加算した結果が最大値 1.0 になるように増分を修正した上で dr_d_ave に加算する。同様に、更新前の欠陥比率に増分 $\text{dr_d}(\text{no_s}, \text{no_d})$ を加算した結果、欠陥比率の最小値 0.0 より小さくなってしまふボクセルがある場合は、そのボクセル 74 については加算した結果が 0.0 になるように増分を修正した上で dr_d_ave に加算する。以上の加算処理を、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する全ての経路 $1 \sim \text{num_path}(\text{no_s}, \text{no_d})$ について行う。そして、以上の加算処理をスキャン no_s の全ての検出器 $1 \sim \text{num_d}$ について行う。以上が、サブセット j に属するスキャン no_s の投影データについての加算処理である。この加算処理をサブセット j に属する全ての投影データについて行う。最後に、以上の加算処理によって生成した $\text{dr_d_ave}(1) \sim \text{dr_d_ave}(\text{num_pix_t})$ を、各ボクセル 74 の経路長の総和 $\text{plen_pix_sub}(j, 1) \sim \text{plen_pix_sub}(j, \text{num_pix_t})$ で夫々割り、欠陥比率の増分の平均値の断層像 $\text{dr_d_ave}(1) \sim \text{dr_d_ave}(\text{num_pix_t})$ を求めて、更新前の断層像 $r_d(1) \sim r_d(\text{num_pix_t})$ に加算することにより欠陥比率断層像を更新する。

[0123] なお、上述した通り、欠陥比率断層像 $r_d(1) \sim r_d(\text{num_pix_t})$ において空気の占めるボクセル 74 については、欠陥比率の値を 0.0 に固定する。

[0124] ステップS 2 2 8 について詳細を説明する。欠陥特定部 5 2 は、欠陥比率断層像 r_d に基づき欠陥 6 1 の 3 次元位置、大きさ、及び形状を特定する。検査対象物 6 0 に含まれる内部の欠陥 6 1 は非常に疎らである。そのため、欠陥 6 1 が含まれない検査対象物 6 0 の減弱情報と形状情報に基づくシミュレーションによって仮想的に生成した仮投影データと実測の投影データとの差分は殆どのスキャン no_s の検出器 no_d において 0 に近い。欠陥比率 3 次元像において、図 1 2 に示した繰り返し処理により、差分が 0 ではない少数のスキャン no_s の検出器 no_d の投影データに対応する経路 7 0 の交わる領域において各検出器 6 8 における、シミュレーションと実測の差分と整合する大きさ及び形状の欠陥比率の像が生成される。欠陥比率 3 次元像において欠陥比率が予め定められた値（例えば 0.8）以上の領域を欠陥 6 1 と特定すればよい。または、欠陥比率 3 次元像において欠陥比率が所定値（例えば 0.8）以上の領域を抽出した後に、連結する領域を夫々判別し、夫々の連結領域のうち、該領域における欠陥比率の総和が予め定められた値以上の領域、換言すると欠陥比率の値と体積が大きな領域を欠陥 6 1 と特定してもよい。または、欠陥比率 3 次元像に 3 次元の平滑化フィルタを掛けた上で、欠陥比率が予め定められた値（例えば 0.6）以上の領域を抽出した後に、連結領域を夫々判別し、夫々の連結領域のうち、該領域における欠陥比率の最大値が所定値以上の領域を欠陥と特定してもよい。平滑化フィルタを掛ける事により、欠陥比率の値と体積が大きな領域の欠陥比率の値が大きくなる。欠陥を特定した後、欠陥特定部 5 2 は、検査対象物 6 0 の内部において特定した欠陥 6 1 の 3 次元位置、大きさ及び形状が分かるように、ディスプレイ 2 6 に表示する。

[0125] このように、本例示的实施形態によれば、欠陥 6 1 の 3 次元位置、大きさ及び形状を精度よく特定することができる。

[0126] [第 2 例示的实施形態]

本例示的实施形態では、第 1 例示的实施形態と異なる欠陥特定処理について説明する。なお、本例示的实施形態においても第 1 例示的实施形態と同様に、事前に経路 7 0 の数のテーブル $num_path(no_s, no_d)$ 、ボクセル 7 4 の

数のテーブルnum_pix(no_s, no_d, no_path)、ボクセル74の番号のテーブルno_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)、及び経路長のテーブルplen_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)を生成しておく。また、欠陥の線減弱係数のテーブルf_d_l(no_e)、f_d_h(no_e)も生成しておく。なお、サブセットno_subに属する経路長の総和のテーブルplen_pix_sub(no_sub, no_pix)は必要無い。

[0127] 図14には、本例示的实施形態の情報処理装置10で実行される欠陥特定処理の一例を表すフローチャートが示されている。図14に示すように、本例示的实施形態の欠陥特定処理は、第1例示的实施形態の欠陥特定処理(図12参照)のステップS210~S216に代えてステップS209の処理を備える点で、異なっている。また、ステップS209の後のステップS218における処理の具体的な内容が第1例示的实施形態と異なっている。

[0128] なお、本例示的实施形態においても、欠陥比率断層像の生成は、線減弱係数の小さい欠陥61と大きい欠陥61の夫々について行う。その際に、線減弱係数の小さい欠陥61の欠陥比率断層像の生成では、実測の投影データ $g(no_s, 1) \sim g(no_s, num_d)$ において、元の減弱情報 $f(no_f, no_e)$ と形状情報 $no_f(no_pix)$ から上記(3)式、(4)式、及び欠陥比率 r_d を0とした(5)式により求まる仮投影データ g_v 、すなわち欠陥を含まない場合の仮投影データ g_v より実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の方が小さいデータについては、予め、実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の値を、その仮投影データ g_v の値に置換えておく。また、線減弱係数の大きい欠陥61の欠陥比率断層像の生成では、逆に仮投影データ g_v より実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の方が大きいデータについては、予め、実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の値を、その仮投影データ g_v の値に置換えておく。

[0129] 本例示的实施形態では、生成した欠陥比率断層像 r_d から求まる仮投影データ g_v と実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の差異を評価する評価関数を定める。そして、評価関数が小さくなるように欠陥比率断層像を更新する。具体的には、欠陥比率断層像 r_d の各ボクセル $1 \sim num_pix_t$ において、欠陥比率断

層像の値（欠陥比率）を少し変化させた時の評価関数の変化を求め、その値を勾配とする。そして、各ボクセル1～num_pix_tについて求めた勾配に基づき欠陥比率断層像を更新する。サブセットj毎に勾配を求め、欠陥比率断層像を更新する。以下、ステップS209及びS218について詳細に説明する。

[0130] ステップS209で欠陥特定部52は、サブセットjに属する投影データに基づき、勾配を計算する。まず、評価関数efを事前に、以下のように定めておく。

[0131]

$$ef = \sum \sum (g_v(\text{no}_s, \text{no}_d) - g(\text{no}_s, \text{no}_d))^2$$

但し、

1つ目のΣはサブセットjに属するスキャンno_sに関する総和である。

2つ目のΣは検出器no_dに関する総和（1～num_dの総和）である。

$g_v(\text{no}_s, \text{no}_d)$ は、欠陥比率断層像から求まるスキャンno_s、検出器no_dの仮投影データを表す。

$g(\text{no}_s, \text{no}_d)$ は、スキャンno_s、検出器no_dの実測の投影データを表す。

．．．（6）

[0132] まず現在の欠陥比率断層像 r_d から、上記（3）式、（4）式、及び（5）式によって夫々の仮投影データ $g_v(\text{no}_s, \text{no}_d)$ を求める。そして、上記（6）式で評価関数efを求める。次に、 $r_d(1)$ 、つまり欠陥比率断層像 r_d のボクセル1の値（欠陥比率）を仮に所定量 α だけ増やして、再度、上記（3）式、（4）式、及び（5）式によって夫々の仮投影データ $g_v(\text{no}_s, \text{no}_d)$ を求め、上記（6）式で評価関数efを求める。なお、 $r_d(1)$ を仮に α だけ増やす場合、上記（5）式においてボクセル $\text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, \text{no_pix_path})$ が1に等しい場合に、 $f_{\text{ext}}(\text{no_pix_path}, \text{no}_e)$ の $r_d(\text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ の代わりに $r_d(\text{no_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) + \alpha$ として強度 $I_e(\text{no}_e)$ を計算すればよい。このようにし

て、欠陥比率断層像 r_d のボクセル1の値を α だけ増やした後の評価関数 ef から、増やす前の評価関数 ef を引いて、ボクセル1における勾配 $\Delta ef(1)$ とする。

[0133] なお、勾配の計算においては、 $r_d(1) + \alpha$ が欠陥比率の最大値1.0を超える場合でも勾配を計算できることが望ましい。そこで、 $r_d(1) + \alpha$ が欠陥比率の最大値1.0を超える場合は、上記(5)式においてボクセル no_pix が1に等しい場合に、 f_ext の $r_d(1)$ の代わりに $1.0 - \alpha$ および 1.0 として夫々強度 $I_e(no_e)$ を計算して評価関数 ef を計算する。そして、 $r_d(1)$ の代わりに 1.0 として計算した評価関数 ef から $r_d(1)$ の代わりに $1.0 - \alpha$ として計算した評価関数 ef を引いて、ボクセル1における勾配 $\Delta ef(1)$ とする。

[0134] 同様にして、ボクセル2、3、 \dots 、 num_pix_t における勾配 $\Delta ef(2)$ 、 $\Delta ef(3)$ 、 \dots 、 $\Delta ef(num_pix_t)$ をそれぞれ求める。なお、 α だけ増やした後の評価関数 ef を高速に求めるために、上記(5)式の計算の際に、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路 no_path が通過する各ボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_path, 1) \sim no_pix(no_s, no_d, no_path, num_pix(no_s, no_d, no_path))$ の何れも、 α だけ増やしたボクセルに該当しない場合、その経路70については、上記(4)式、及び(5)式の計算を省略し、経路 no_path の放射線Rの強度 $I(no_path)$ を、 α だけ増やす前の強度 $I(no_path)$ と同じ値としてもよい。また、空気の占めるボクセルについては、欠陥比率を0.0に固定するため勾配 Δef を0とする。この場合、上記(3)式、(4)式、及び(5)式の計算を行わない。

[0135] なお、評価関数 ef は、欠陥比率断層像 r_d から求まる仮投影データ g_v と実測の投影データ $g(no_s, no_d)$ の差異を評価可能な関数であれば何れの関数でもよい。例えば、以下の関数でもよい。

$$ef = \sum \sum \text{abs}(g_v(no_s, no_d) - g(no_s, no_d))$$

但し、

1つ目の Σ はサブセット j に属するスキャン no_s に関する総和である。

2つ目の Σ は検出器 no_d に関する総和（1～ num_d の総和）である。

$abs(x)$ は x の絶対値を表す。

$g_v(no_s, no_d)$ は、欠陥比率断層像から求まるスキャン no_s 、検出器 no_d の仮投影データを表す。

$g(no_s, no_d)$ は、スキャン no_s 、検出器 no_d の実測の投影データを表す。

．．． (7)

[0136] ステップS 2 1 8の処理について説明する。欠陥特定部5 2は、欠陥比率断層像 r_d を、以下の式により更新する。

$$r_d(1) \leftarrow r_d(1) - \beta \times \Delta ef(1)$$

$$r_d(2) \leftarrow r_d(2) - \beta \times \Delta ef(2)$$

．．．．．

$$r_d(num_pix_t) \leftarrow r_d(num_pix_t) - \beta \times \Delta ef(num_pix_t)$$

但し、 β は更新のステップサイズを表す。．．． (8)

[0137] なお、更新の結果、欠陥比率 r_d の値が欠陥比率の最小値0.0より小さくなってしまふボクセル7 4がある場合は、そのボクセル7 4については欠陥比率 r_d の値を0.0にする。また、更新の結果、欠陥比率 r_d の値が欠陥比率の最大値1.0を超えてしまふボクセル7 4がある場合は、そのボクセル7 4については欠陥比率 r_d の値を最大値1.0にする。

[0138] 以上、説明した処理により、本例示的实施形態においても、減弱係数の小さい欠陥6 1と線減弱係数の大きい欠陥6 1の夫々について欠陥比率断層像 r_d を生成することができる。

[0139] なお、本開示の技術は、上記各形態に限定されず、さらに種々の変形が可能である。例えば、以下のような変形が可能である。

[0140] 上記各例示的实施形態では、スキャン方式がコーンビーム方式の例を説明したが、スキャン方式は特に限定されず、任意のスキャン方式に適用できる

。例えばペンシルビーム（平行ビーム）方式の場合、線源 64 及び検出器 68 の x 方向及び y 方向の一連の平行走査による 2 次元のデータを 1 つの投影データとする。そして、異なる投影角度のデータを別の投影データとした上で、コーンビーム方式の場合と同様に撮影位置特定処理及び欠陥特定処理を実施することができる。図 8C はコーンビーム方式を想定した撮影系の図だが、ペンシルビーム（平行ビーム）方式の場合、夫々の検出器 68 に対応して線源 64 が存在するため、図 8C の x y 平面において、夫々の検出器 68 と同じ x、y 座標に各線源 64 が存在することとなる。勿論、ペンシルビーム方式の場合も、検査対象物 60 に対して、各投影データの撮影系の位置及び姿勢は任意でよい。検査対象物 60 の座標系を固定した場合の、各投影データの撮影系の図 8C に示した y z 平面、若しくは x z 平面は一致しなくてもよい。ペンシルビーム方式の場合も、撮影位置特定処理では図 7 に示した方法で実測の投影データと仮投影データとの類似度が閾値より大きくなるように撮影位置を特定すればよく、欠陥特定処理では、各投影データをサブセットに分割し、図 12 または図 14 に示した欠陥特定処理により欠陥比率断層像を生成し、その欠陥比率断層像に基づき欠陥 61 の 3 次元位置、形状、及び大きさを特定することができる。なお、ペンシルビーム（平行ビーム）方式の場合、線源 64 に対して 1 個の検出器 68 が対応するので、図 10A に示した方法によって 1 個の検出器 68 に入射する経路 70 のみを設定すればよい。

[0141] またファンビーム方式の場合、1 次元に配置された検出器 68 で検出した 1 次元のデータを x 方向又は y 方向に連結した 2 次元のデータを 1 つの投影データとし、異なる投影角度のデータを別の投影データとした上で、コーンビーム方式の場合と同様に撮影位置特定処理及び欠陥特定処理を実施することができる。ファンビーム方式の場合、夫々の（1次元の）検出器 68 に対応して線源 64 が存在するため、図 8C の x y 平面において、x 軸又は y 軸に沿って夫々の（1次元の）検出器 68 と同じ x 座標または y 座標に各線源 64 が存在することとなる。ファンビーム方式の場合も、検査対象物 60 に

対して、各投影データの撮影系の位置及び姿勢は任意でよい。ファンビーム方式の場合も、上述した図7に示した撮影位置特定処理により撮影位置を特定すればよい。また、図12または図14に示した欠陥特定処理により欠陥比率断層像を生成し、その欠陥比率断層像に基づき欠陥61の3次元位置、形状、及び大きさを特定することができる。なお、ファンビーム方式の場合、線源64に対して1次元に配置された検出器68が対応するので、図10Aに示した方法によって1次元に配置された検出器68に入射する経路70のみを設定すればよい。

[0142] また、上記各例示的实施形態では放射線Rの経路70を等間隔で設定したが、経路70毎に間隔を変えることにより、経路70毎の放射線Rの強度の違いを表現することができる。例えば、線源64の中心ほど照射される放射線Rの強度を大きく、端に近いほど放射線Rの強度を小さく設定したい場合、線源64の中心ほど狭い間隔（密）に、端に近いほど広い間隔（粗）に経路70を設定すればよい。または、夫々の経路70ごとに線源64から照射される強度 $I0_e(no_e)$ を変えてもよい。その場合、事前にスキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路 no_path における強度のテーブル $I0_e(no_s, no_d, no_path, no_e)$ を生成しておき、上記(2)式や(5)式において線源64から照射される放射線Rのエネルギー $e(no_e)$ における強度 $I0_e(no_e)$ を、 $I0_e(no_s, no_d, no_path, no_e)$ にして経路70に依って変えればよい。

[0143] また、上記各例示的实施形態は、検査対象物60の線減弱係数の情報が2つ以上のエネルギー帯域における値ではなく1つの値の場合でも実施可能である。線減弱係数の情報が1つの値の場合、図9に示した線減弱係数テーブル $f(no_f, no_e)$ は、部材の番号 no_f ごとに1つの値 $f(no_f)$ となる。また上記(2)式は、下記(2_2)式となる。

$$I = I0 \times \exp(-\{(f(no_f(no_pix(1))) \times plen_pix(1)) + (f(no_f(no_pix(2))) \times plen_pix(2)) + \dots + (f(no_f(no_pix(num_pix))) \times plen_pix(num_pix))\}) \quad \dots (2_2)$$

[0144] そして上記（１）式を省略し、各経路 70 について上記（2__2）式で求めた強度 I を、検出器 68 毎に積算して仮投影データを生成することができる。

[0145] また、欠陥の線減弱係数 $f_d_l(no_e)$ 及び $f_d_h(no_e)$ も、１つの値 f_d_l 及び f_d_h となる。また上記（５）式は下記の（5__2）式となる。

$$I = I_0 \times \exp(-\{(f_ext(1) \times plen_pix(no_s, no_d, no_path, 1)) + (f_ext(2) \times plen_pix(no_s, no_d, no_path, 2)) + \dots + (f_ext(num_pix(no_s, no_d, no_path)) \times plen_pix(no_s, no_d, no_path, num_pix(no_s, no_d, no_path)))\})$$

但し、

$$f_ext(no_pix_path) = f(no_f(no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path))) + \{r_d(no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)) \times (f_d - f(no_f(no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)))\}$$

線減弱係数の小さい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d = f_d_l$

線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d = f_d_h$

・・・（5__2）

[0146] そして上記（４）式を省略して、各経路 70 について上記（5__2）式で求めた強度 I を、それぞれ $I(1)$ 、 $I(2)$ 、・・・として上記（３）式から仮投影データ g_v を求めることができる。

[0147] 上記各例示的实施形態において各検出器 68 に入射する経路 70 を近似的に 1 本にまとめることができる。その場合、撮影位置特定処理でも欠陥特定処理と同様のテーブルを事前に生成する必要がある。経路 70 を 1 本にまとめる場合、事前に生成するテーブルは以下になる。なお、撮影位置特定処理では、以下のテーブルを、撮影位置を更新する度に再生成する。

・テーブル $num_path(no_s, no_d)$: スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経

路 70 の数を表す。経路 70 を 1 本にまとめる場合でも、第 1 例示的实施形態では、まとめる前の経路 70 の数のテーブルが必要になる。

・テーブル num_pix(no_s, no_d) : 経路 70 を 1 本にまとめる前の、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する夫々の経路 1 ~ num_path(no_s, no_d) のうち、少なくとも 1 本の経路 70 が通過するボクセル 74 の数を表す。経路 70 を 1 本にまとめない場合はテーブル num_pix(no_s, no_d, no_path) を生成したが、経路 70 を 1 本にまとめる場合は no_path を省くことができる。

・テーブル no_pix(no_s, no_d, no_pix_path) : 経路 70 を 1 本にまとめる前の、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する夫々の経路 1 ~ num_path(no_s, no_d) のうち、少なくとも 1 本の経路 70 が通過する no_pix_path 番目のボクセル 74 の番号を表す。経路 70 を 1 本にまとめない場合はテーブル no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path) を生成したが、経路 70 を 1 本にまとめる場合は no_path を省くことができる。

・テーブル plen_pix(no_s, no_d, no_pix_path) : 経路 70 を 1 本にまとめる前の、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する夫々の経路 1 ~ num_path(no_s, no_d) のうち、少なくとも 1 本の経路 70 が通過する no_pix_path 番目のボクセル 74 において、そのボクセルを通過する経路を 1 本にまとめた経路長、つまり経路長の平均値を表す。plen_pix(no_s, no_d, no_pix_path) は、経路 70 を 1 本にまとめる前の、経路 1 ~ num_path(no_s, no_d) のうち、少なくとも 1 本の経路 70 が通過するボクセル 74 を全て抽出し、各ボクセル 74 において、経路 1 ~ num_path(no_s, no_d) の通過する経路長の総和を求め、その総和を num_path(no_s, no_d) で割ることにより求められる。なお、テーブル no_pix(no_s, no_d, no_pix_path) と plen_pix(no_s, no_d, no_pix_path) におけるボクセル 74 の番号 no_pix_path は共通とする。経路 70 を 1 本にまとめない場合はテーブル plen_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path) を生成したが、経路 70 を 1 本にまとめる場合は no_path を省くことができる。

[0148] ・テーブル I0_e(no_s, no_d, no_e) : 経路 70 を 1 本にまとめる前の、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する全部の経路 70 の放射線 R のエネルギー e(n

o_e)における強度の総和を表す。夫々の検出器に入射する経路を1本にまとめる場合、1本にまとめる前の各検出器68に入射する経路70の数が検出器68毎に異なる、つまり上記(2)式及び上記(5)式において、線源64から放射されるエネルギーe(no_e)における強度I0_e(no_e)が検出器68毎に異なる。従って、強度I0_e(no_e)の代わりに事前にテーブルI0_e(no_s, no_d, no_e)を生成しておく。なお、I0_e(no_s, no_d, no_e)は撮影位置に依らないため事前に1度だけ生成すればよい。

・テーブルplen_pix_sub(no_sub, no_pix) : サブセットno_subに属する全てのスキンの全ての検出器68に入射する全ての経路70のボクセルno_pixを通過する経路長の総和を表す。経路70を1本にまとめる場合でも、第1例示的实施形態では、まとめる前の経路長の総和のテーブルが必要になる。

[0149] 各検出器68に入射する経路70を近似的に1本にまとめる場合、上記(2)式は、下記の(2_3)式となる。

$$I_e(\text{no}_e) = I0_e(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no}_e) \times \exp(-\{(f(\text{no}_f(\text{no}_\text{pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, 1)), \text{no}_e) \times \text{plen_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, 1)) + (f(\text{no}_f(\text{no}_\text{pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, 2)), \text{no}_e) \times \text{plen_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, 2)) + \dots + (f(\text{no}_f(\text{no}_\text{pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{num_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d))), \text{no}_e) \times \text{plen_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{num_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d)))\}) \dots \quad (2_3)$$

[0150] そして上記(1)式により検出器no_dに入射する強度Iを求めて仮投影データを生成することができる。

[0151] また、上記(5)式は、下記の(5_3)式となる。

$$I_e(\text{no}_e) = I0_e(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{no}_e) \times \exp(-\{(f_ext(1, \text{no}_e) \times \text{plen_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, 1)) + (f_ext(2, \text{no}_e) \times \text{plen_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, 2)) + \dots + (f_ext(\text{num_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d), \text{no}_e) \times \text{plen_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d, \text{num_pix}(\text{no}_s, \text{no}_d)))\})$$

但し、

$$f_ext(no_pix_path, no_e) = f(no_f(no_pix(no_s, no_d, no_pix_path)), no_e) + \{r_d(no_pix(no_s, no_d, no_pix_path)) \times (f_d(no_e) - f(no_f(no_pix(no_s, no_d, no_pix_path)), no_e))\}$$

線減弱係数の小さい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d(no_e) = f_d_l(no_e)$

線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d(no_e) = f_d_h(no_e)$. . . (5_3)

[0152] そして上記(4)式を下記の(4_3)式として、仮投影データ g_v を求めることができる。この場合、上記(3)式は必要無い。

$$g_v = (e(1) \times I_e(1)) + (e(2) \times I_e(2)) + \dots + (e(num_e) \times I_e(num_e)) \dots (4_3)$$

[0153] また、第1例示的实施形態の図12に示した欠陥特定処理のステップS218において、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路70における欠陥比率の増分の推定値 $dr_d(no_s, no_d)$ を、増分の平均値の断層像 dr_d_ave の no_pix_path 番目のボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_pix_path)$ に経路長で重み付けて加算する際の、経路長で重み付けた増分を表す式は、 $dr_d(no_s, no_d) \times plen_pix(no_s, no_d, no_pix_path) \times num_path(no_s, no_d)$ となる。

[0154] 各検出器68に入射する経路70を近似的に1本にまとめる場合で、更に検査対象物60の線減弱係数の情報が2つ以上のエネルギー帯域における値ではなく、1つの値である場合は、上記(2)式を以下の(2_4)式として検出器 no_d に入射する強度 I を求めて仮投影データを生成することができる。この場合、上記(1)式は、不要となる。

$$I = I0(no_s, no_d) \times \exp(-\{(f(no_f(no_pix(no_s, no_d, 1))) \times plen_pix(no_s, no_d, 1)) + (f(no_f(no_pix(no_s, no_d, 2))) \times plen_pix(no_s,$$

$$\text{no_d, 2))} + \dots + (\text{f}(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s, no_d, num_pix}(\text{no_s, no_d})))) \times \text{plen_pix}(\text{no_s, no_d, num_pix}(\text{no_s, no_d}))) \dots (2_4)$$

[0155] また、上記（5）式を下記の（5__4）式として、仮投影データg_vを求めることができる。この場合、上記（3）式及び（4）式は、不要となる。

$$g_v = I0_e(\text{no_s, no_d}) \times \exp(-\{(\text{f_ext}(1) \times \text{plen_pix}(\text{no_s, no_d, 1})) + (\text{f_ext}(2) \times \text{plen_pix}(\text{no_s, no_d, 2})) + \dots + (\text{f_ext}(\text{num_pix}(\text{no_s, no_d})) \times \text{plen_pix}(\text{no_s, no_d, num_pix}(\text{no_s, no_d})))\})$$

但し、

$$\text{f_ext}(\text{no_pix_path}) = \text{f}(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s, no_d, no_pix_path}))) + \{r_d(\text{no_pix}(\text{no_s, no_d, no_pix_path})) \times (\text{f_d} - \text{f}(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s, no_d, no_pix_path}))))\}$$

線減弱係数の小さい欠陥の欠陥比率断層像の生成においてf_d=f_d_l

線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成においてf_d=f_d_h

$$\dots (5_4)$$

[0156] また、上記各例示的实施形態において、検出器68の各エネルギーにおける検出効率をde(1)、de(2)・・・de(num_e)として上記（1）式及び（4）式を夫々、下記の（1__5）式及び（4__5）式にして放射線Rの強度Iに検出器68の検出効率を反映してもよい。

$$I = (e(1) \times I_e(1) \times de(1)) + (e(2) \times I_e(2) \times de(2)) + \dots + (e(\text{num_e}) \times I_e(\text{num_e}) \times de(\text{num_e})) \dots (1_5)$$

$$I(\text{no_path}) = (e(1) \times I_e(1) \times de(1)) + (e(2) \times I_e(2) \times de(2)) + \dots + (e(\text{num_e}) \times I_e(\text{num_e}) \times de(\text{num_e})) \dots (4_5)$$

[0157] また、上記第1例示的实施形態の欠陥特定処理（図12参照）において、

線減弱係数の小さい欠陥61及び線減弱係数の大きい欠陥61の少なくとも一方について、複数の種類を設定してもよい。例えば、線減弱係数の小さい欠陥61として空気の他に、線減弱係数の小さい異物も設定してもよい。また線減弱係数の大きい欠陥61として、線減弱係数の大きい異なる複数の種類の異物を設定してもよい。複数の種類の欠陥61を設定する場合、欠陥61の線減弱係数として $f_{d_l}(no_e)$ 及び $f_{d_h}(no_e)$ の代わりに $f_{d_l}(no_f_d_l, no_e)$ 及び $f_{d_h}(no_f_d_h, no_e)$ を事前に定めておく。ここで、 $no_f_d_l$ 及び $no_f_d_h$ は各々、線減弱係数の小さい欠陥61の番号及び線減弱係数の大きい欠陥61の番号を表す。また、 $f_{d_l}(no_f_d_l, no_e)$ 及び $f_{d_h}(no_f_d_h, no_e)$ は夫々、線減弱係数の小さい欠陥 $no_f_d_l$ 及び線減弱係数の大きい欠陥 $no_f_d_h$ について、放射線のエネルギー no_e における線減弱係数を表す。なお、全ての種類の線減弱係数の小さい欠陥61について、線減弱係数 f_{d_l} は検査対象物60に含まれる空気を除く全ての部材の線減弱係数 f より全てのエネルギー no_e において小さいものとし、全ての種類の線減弱係数の大きい欠陥61について、線減弱係数 f_{d_h} は、検査対象物に含まれる、空気を除く全ての部材の線減弱係数 f より全てのエネルギー no_e において大きいものとする。また、番号 $no_f_d_l-1$ の欠陥と比べて番号 $no_f_d_l$ の欠陥の方が、線減弱係数 f_{d_l} の値が全てのエネルギー no_e において小さいものとし、番号 $no_f_d_h-1$ の欠陥と比べて番号 $no_f_d_h$ の欠陥の方が、線減弱係数 f_{d_h} の値が全てのエネルギー no_e において大きいものとする。

[0158] 以下、線減弱係数の小さい欠陥61について、複数の種類の欠陥61を設定する場合の欠陥特定処理（図12参照）を説明する。なお、1種類の欠陥61を設定する場合と同様の処理は説明を省略する。また、線減弱係数の大きい欠陥61についての説明は省略する。

[0159] まず、ステップS204で欠陥特定部52は、欠陥比率断層像 $r_d(no_pix)$ と共に欠陥種類断層像 $no_f_d(no_pix)$ も生成する。ここで欠陥種類の数を num_f_d とする。番号 num_f_d の欠陥が、最小の線減弱係数の欠陥である。そして $no_f_d(no_$

pix)の初期値として全ボクセルの値を、線減弱係数が最大の欠陥である場合の1に設定する。また、 $r_d(\text{no_pix})$ の初期値として全ボクセルの値を、欠陥が含まれない場合の0.0に設定する。

[0160] また、ステップS 2 1 2では、上記(5)式を下記の(5__5)式とする。

$$I_e(\text{no_e}) = I0_e(\text{no_e}) \times \exp(-\{(f_ext(1, \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, 1)) + (f_ext(2, \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, 2)) + \dots + (f_ext(\text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}), \text{no_e}) \times \text{plen_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{num_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path})))\})$$

但し、

欠陥の番号 $\text{no_f_d}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ が1の場合、

$$f_ext(\text{no_pix_path}, \text{no_e}) = f(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})), \text{no_e}) + \{r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) \times (f_d(1, \text{no_e}) - f(\text{no_f}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})), \text{no_e}))\}$$

欠陥の番号 $\text{no_f_d}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ が2以上の場合、

$$f_ext(\text{no_pix_path}, \text{no_e}) = f_d(\text{no_f_d}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) - 1, \text{no_e}) + \{r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) \times (f_d(\text{no_f_d}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})), \text{no_e}) - f_d(\text{no_f_d}(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path})) - 1, \text{no_e}))\}$$

線減弱係数の小さい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d(\text{no_f_d}, \text{no_e}) = f_d_l(\text{no_f_d}, \text{no_e})$

線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成において $f_d(\text{no_f_d}, \text{no_e}) = f_d_h(\text{no_f_d}, \text{no_e}) \dots (5_5)$

[0161] 上記(5__5)式は、スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路 no_path の

通過するno_pix_path番目のボクセルno_pixにおけるエネルギーno_eの線減弱係数をf_extとして、そのボクセルの欠陥の番号no_f_dが1の場合、元の減弱情報fと形状情報no_fによる線減弱係数f(no_f(no_pix), no_e)を比率1 - r_d、番号1の欠陥の線減弱係数f_d_l(1, no_e)を比率r_dで足した線減弱係数をf_extとすることを意味している。また、そのボクセルの欠陥の番号no_f_dが2以上の場合、番号no_f_d-1の欠陥の線減弱係数f_d_l(no_f_d-1, no_e)を比率1 - r_d、番号no_f_dの欠陥の線減弱係数f_d_l(no_f_d, no_e)を比率r_dで足した線減弱係数をf_extとすることを意味している。

[0162] ステップS212では、複数の種類の欠陥61を設定する場合も1種類の欠陥61を設定する場合と同様に、各スキャンno_sの検出器no_dについて、仮投影データg_vが実測の投影データg(no_s, no_d)に一致するように欠陥比率の増分を求めdr_d(no_s, no_d)として保存しておく。ここで、複数の種類の欠陥61を設定する場合は、番号1の欠陥の欠陥比率0.0~1.0の区間（線減弱係数が、元の欠陥を含まない線減弱係数f~番号1の欠陥の線減弱係数f_d_l(1)の区間）、番号2の欠陥の欠陥比率0.0~1.0の区間（線減弱係数が、番号1の欠陥の線減弱係数f_d_l(1)~番号2の欠陥の線減弱係数f_d_l(2)の区間）、・・・の各欠陥比率の区間において、欠陥比率の増分を変える。例えば、番号1の欠陥の欠陥比率0.0~1.0の区間における増分を α として、この増分に相当する番号2の欠陥の欠陥比率0.0~1.0の区間における増分を $\gamma_2 \times \alpha$ 、番号3の欠陥の欠陥比率0.0~1.0の区間における増分を $\gamma_3 \times \alpha$ ・・・とする。 γ_2 、 γ_3 ・・・は、夫々の区間における欠陥比率の増分の変換比率であり、欠陥比率の増分 α 、 $\gamma_2 \times \alpha$ 、 $\gamma_3 \times \alpha$ ・・・による各エネルギーにおける線減弱係数の変化量の総和値（若しくは平均値）が夫々の区間で同じになるように決定する。そして、夫々のスキャンno_sの検出器no_dに入射する全ての経路の通過する全てのボクセル（空気を除く）における欠陥比率を α だけ変化させる（増やす又は減らす）際に、夫々のボクセルにおいて以下のルールで変化させる。現在の欠陥比率r_dを $\gamma \times \alpha$ だけ変化させたr_d + $\gamma \times \alpha$ が欠陥比率0.0~1.0の範囲内ならばそのまま変化させる。なお、

γ はそのボクセルにおける欠陥の番号 no_f_d の欠陥比率 $0.0 \sim 1.0$ の区間における変換比率である。欠陥比率 0.0 より小さくなる場合、欠陥の番号 no_f_d が 1 ならば 0.0 とし、線減弱係数 f_ext を、元の欠陥を含まない線減弱係数 f より小さな値にはしない。また、欠陥の番号 no_f_d が 2 以上ならば、まずその欠陥の番号 no_f_d の区間において欠陥比率を 0.0 まで変化させた上で、 no_f_d を 1 減らすと共に、 1 減らした欠陥の番号の区間において欠陥比率 1.0 から（その区間における変換比率を乗じた）残りの分だけ変化させる。また、欠陥比率 1.0 より大きくなる場合、欠陥の番号 no_f_d が num_f_d （最大）ならば 1.0 とし、それ以外ならば、まず、その欠陥の番号 no_f_d の区間において欠陥比率を 1.0 まで変化させた上で、 no_f_d を 1 増やすと共に、 1 増やした欠陥の番号の区間において欠陥比率 0.0 から（その区間における変換比率を乗じた）残りの分だけ変化させる。

- [0163] また、ステップS 2 1 8では、複数の種類の欠陥を設定する場合も1種類の欠陥を設定する場合と同様に、サブセット j に属する全ての投影データについて計算した欠陥比率の増分 $dr_d(no_s, 1) \sim dr_d(no_s, num_d)$ に基づき断層像を更新する。増分の平均値の断層像 dr_d_ave において、サブセット j に属する全てのスキヤンの全ての検出器68の全ての経路70について通過する各ボクセルに経路長で重み付けた増分を加算していく。最後に dr_d_ave の各ボクセルの値を各ボクセルの経路長の総和 $plen_pix_sub$ で割ることにより各ボクセルについて増分の平均値を求めて、更新前の断層像 r_d に加算することにより断層像を更新する。ここで、更新前の欠陥比率に増分 dr_d を加算した結果、欠陥の番号 no_f_d が num_f_d （最大）で欠陥比率の最大値 1.0 を超えてしまうボクセルがある場合は、そのボクセルについては加算した結果、欠陥の番号 no_f_d が num_f_d （最大）で欠陥比率の最大値 1.0 になるように増分を修正した上で dr_d_ave に加算する。同様に、更新前の欠陥比率に増分 dr_d を加算した結果、欠陥の番号 no_f_d が 1 で欠陥比率の最小値 0.0 より小さくなってしまふボクセルがある場合は、そのボクセルについては加算した結果、欠陥の番号 no_f_d が 1 で欠陥比率の最小値 0.0 になるように増分を修正した上

でdr_d_aveに加算する。複数の種類の欠陥を設定する場合、欠陥比率断層像r_d(no_pix)と共に欠陥種類断層像no_f_d(no_pix)も更新する。

[0164] 複数の種類の欠陥を設定する場合、欠陥比率断層像と欠陥種類断層像とに基づき欠陥を、その種類と3次元位置と共に特定する。例えば、欠陥比率断層像において、欠陥の番号が1で欠陥比率が予め定められた値（例えば0.8）未満の領域を欠陥無し、欠陥の番号が1で欠陥比率が予め定められた値（例えば0.8）以上の領域及び欠陥の番号が2で欠陥比率が0.5以下の領域を番号1の欠陥、欠陥の番号が2で欠陥比率が0.5より大きい領域及び欠陥の番号が3で欠陥比率が0.5以下の領域を番号2の欠陥、・・・というように欠陥種類と共に特定することができる。または、一旦、欠陥種類も含めた欠陥比率断層像に変換した上で特定してもよい。例えば、欠陥比率断層像において欠陥の番号が2のボクセルの欠陥比率には1.0、欠陥の番号が3のボクセルの欠陥比率には2.0、・・・を夫々加算した上で、欠陥比率が予め定められた値（例えば0.8）未満の領域を欠陥無し、欠陥比率が予め定められた値（例えば0.8）以上1.5以下の領域を番号1の欠陥、欠陥比率が1.5より大きく2.5以下の領域を番号2の欠陥、・・・というように欠陥種類と共に特定することができる。または、欠陥種類も含めた欠陥比率断層像に変換した上で、欠陥比率断層像において、夫々の欠陥の番号について、その欠陥比率の値（0.0、1.0、2.0・・・）を中心とした予め定められた値の範囲内に入る領域を夫々抽出した後に、繋がる領域（連結する領域）を夫々判別し、夫々の連結領域のうち、該領域における欠陥比率の総和が夫々の欠陥の番号に応じた予め定められた値以上の領域（欠陥比率の値と体積が大きな領域）のみを夫々の番号の欠陥と特定してもよい。欠陥を特定した後、検査対象物の内部において特定した欠陥の3次元位置、大きさ及び形状が分かるように、また欠陥種類が分かるように表示すればよい。

[0165] 第2例示的实施形態の欠陥特定処理（図14参照）においても、線減弱係数の小さい欠陥及び線減弱係数の大きい欠陥の少なくとも一方について複数の種類を設定してもよい。その場合、第2例示的实施形態でも欠陥比率断層

像 $r_d(\text{no_pix})$ と共に欠陥種類断層像 $\text{no_f_d}(\text{no_pix})$ も生成する。第2例示的実施形態の欠陥特定処理のステップS209では、断層像の各ボクセルについて欠陥比率を仮に所定量 α だけ増やして勾配を求める際に、各ボクセルにおける欠陥比率 r_d を仮に、そのボクセルの欠陥の番号 no_f_d の変換比率 γ を乗じた $\gamma \times \alpha$ だけ増やす。そして、 $\gamma \times \alpha$ だけ増やした結果、欠陥比率1.0より大きくなる場合は、欠陥の番号 no_f_d の区間において欠陥比率を1.0まで増やした上で、 no_f_d を1増やすと共に、1増やした欠陥の番号の区間において（その区間における変換比率を乗じた）残りの分だけ増やす。そのようにして欠陥比率（及び、場合によって欠陥の番号も）を仮に増やした上で上記（3）式、（4）式、及び（5__5）式によって夫々の $g_v(\text{no_s}, \text{no_d})$ を求める。そして、上記（6）式または（7）式で評価関数 ef を求める。その評価関数 ef から現在の断層像 r_d 及び no_f_d から、上記（3）式、（4）式、（5__5）式、及び（6）式（または（7）式）によって求めた評価関数 ef を引いて勾配を求める。なお、欠陥比率を仮に所定量 α だけ増やした結果、欠陥の番号 no_f_d が num_f_d （最大）で欠陥比率の最大値1.0を超えてしまうボクセルについては、そのボクセルにおいて欠陥の番号 no_f_d を num_f_d 、欠陥比率を1.0として計算した評価関数 ef から、欠陥の番号 no_f_d を num_f_d 、欠陥比率を $1.0 - \gamma \times \alpha$ （ γ は欠陥の番号 num_f_d の区間における変換比率）として計算した評価関数 ef を引いて勾配を求めればよい。

[0166] 第2例示的実施形態の欠陥特定処理（図14参照）のステップS218では、断層像 r_d を以下のルールで更新する。各ボクセル no_pix において更新後の欠陥比率 $r_d(\text{no_pix}) - \gamma \times \beta \times \Delta ef(\text{no_pix})$ （ γ はそのボクセルにおける欠陥の番号 no_f_d の区間における変換比率）が欠陥比率0.0~1.0の範囲内ならばそのまま更新する。欠陥比率0.0より小さくなる場合、欠陥の番号 no_f_d が1ならば0.0とし、欠陥の番号 no_f_d が2以上ならば、まずその欠陥の番号 no_f_d の区間において欠陥比率を0.0まで変化させた上で、 no_f_d を1減らすと共に、1減らした欠陥の番号の区間において欠陥比率1.0から（その区間における変換比率を乗じた）残りの分だけ変化させて更新する。また、欠陥比

率1.0より大きくなる場合、欠陥の番号no_f_dがnum_f_d（最大）ならば1.0とし、それ以外ならば、まずその欠陥の番号no_f_dの区間において欠陥比率を1.0まで変化させた上で、no_f_dを1増やすと共に、1増やした欠陥の番号の区間において欠陥比率0.0から（その区間における変換比率を乗じた）残りの分だけ増やして更新する。上記のルールで欠陥比率断層像r_d(no_pix)と共に欠陥種類断層像no_f_d(no_pix)も更新する。

[0167] また、上記第1例示的实施形態の欠陥特定処理（図12参照）のステップS212において、欠陥比率の差分dr_d(no_s, no_d)を計算する代わりに欠陥比率の比としてrr_d(no_s, no_d)を計算してもよい。具体的には、線減弱係数の小さい欠陥の欠陥比率断層像の生成においては、仮投影データg_vと、実測の投影データg(no_s, no_d)を比較し、仮投影データg_vの方が大きい場合、または小さい場合、スキャンno_sの検出器no_dに入射する全ての経路について、通過する全てのボクセルにおける欠陥比率を所定量の比だけ減らして、または増やして仮投影データg_vを再度求めて実測の投影データg(no_s, no_d)と比較する処理を、g_vがg(no_s, no_d)以下になる、または以上になるまで繰り返す。そして、実測の投影データg(no_s, no_d)以下になる、または以上になる直前の仮投影データg_vと以下になる、または以上になる仮投影データg_vのうち、実測の投影データg(no_s, no_d)により近い方の仮投影データg_vを採用することとする。その計算の際の欠陥比率の比をrr_d(no_s, no_d)として保存しておいてもよい。ここで、所定量の比だけ減らす、または増やすとは、比の所定量の増分を定め、比を、その増分だけ減らし、または増やしながら乗じる事を意味する。例えば、比の所定量の増分を0.01と定め、比を0.99倍、0.98倍・・・と減らし、または1.01倍、1.02倍・・・と増やしながら乗じることを意味する。欠陥比率の所定量の比を α として、比 α だけ減らして、または増やして仮投影データg_vを計算するには、上記（5）式において、f_ext(no_pix_path, no_e)のr_d(no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path))の代わりに、 $\alpha \times r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ とすればよい。 $\alpha \times r_d(\text{no_pix}(\text{no_s}, \text{no_d}, \text{no_path}, \text{no_pix_path}))$ が欠陥

比率の最大値1.0を超えてしまうボクセルがある場合は、そのボクセルについては欠陥比率を最大値1.0に固定する。

[0168] 欠陥比率の比 $rr_d(no_s, no_d)$ を計算する場合、欠陥特定処理（図12参照）のステップS218では、まず比の平均値の断層像を $rr_d_ave(no_pix)$ として $rr_d_ave(no_pix)$ を全ボクセルゼロで初期化し、そしてサブセット j に属する全ての投影データについて欠陥比率の比 $rr_d(no_s, 1) \sim rr_d(no_s, num_d)$ を比の平均値の断層像 rr_d_ave の各ボクセルに経路長で重み付けて加算してゆく。最後に rr_d_ave の各ボクセルの値を各ボクセルの経路長の総和 $p_len_pix_sub$ で割ることにより各ボクセルについて比の平均値を求めて、更新前の断層像 r_d にその比を乗じることにより断層像を更新する。欠陥比率の比 $rr_d(no_s, no_d)$ を平均値の断層像 rr_d_ave の各ボクセルに加算する際に、更新前の断層像 r_d に比を乗じた結果、欠陥比率の最大値を超えてしまうボクセルがある場合は、そのボクセルについては乗じた結果が最大値1.0になるように比を修正した上で rr_d_ave に加算する。

[0169] また、上記各例示的实施形態の欠陥特定処理（図12、図14参照）において、欠陥比率断層像 r_d を生成した後、換言すると全体の更新回数 i が所定回数 N_i を超えて欠陥比率断層像の生成を完了した後、欠陥比率が予め定められた値（例えば0.1）以上で繋がる領域（連結する領域）を夫々判別し、夫々の連結領域のうち、該領域における欠陥比率の平均値及び総和値の少なくとも一方が予め定められた値以上、且つ総和値が最大の領域（欠陥比率の値と体積が最大の領域）を欠陥と確定（特定）して、その領域の全ボクセルの欠陥比率を1.0に固定した上で、ステップS206に戻って、全体の更新回数 i を1に再度設定して、再び欠陥比率断層像の生成を繰り返してもよい。このように、欠陥の確定（特定）と欠陥比率断層像の生成を繰り返し（欠陥比率の総和値が最大の領域を欠陥と確定 → 欠陥確定した領域の欠陥比率を1.0に固定して欠陥比率断層像を生成 → 欠陥比率の総和値が最大の領域を欠陥と確定 → 欠陥確定した領域の欠陥比率を1.0に固定して欠陥比率断層像を生成 → …を繰り返し）、最終的に欠陥比率の平均値及び総和値の少なくとも

も一方が予め定められた値以上の連結領域が見つからなくなった時点で欠陥比率断層像の生成を完了してもよい。このように、最も尤もらしい欠陥を確定することで、残りの欠陥比率断層像をより正確に生成することができる。つまり、最も尤もらしい欠陥の確定と残りの欠陥比率断層像の生成を繰り返すことにより欠陥比率断層像をより正確に生成することができ、より正確に欠陥を特定することができる。

[0170] 上記各例示的实施形態の欠陥特定処理（図12及び図14参照）において、実測の投影データ $g(\text{no}_s, 1) \sim g(\text{no}_s, \text{num}_d)$ からノイズを減らして欠陥比率断層像を生成してもよい。具体的には、線減弱係数の小さい欠陥61の欠陥比率断層像の生成では、実測の投影データ $g(\text{no}_s, 1) \sim g(\text{no}_s, \text{num}_d)$ において、元の減弱情報 $f(\text{no}_f, \text{no}_e)$ と形状情報 $\text{no}_f(\text{no}_\text{pix})$ から上記(3)式、(4)式、及び欠陥比率 r_d を0とした(5)式により求まる仮投影データ g_v 、すなわち欠陥を含まない場合の仮投影データ g_v より実測の投影データ g の方が小さいデータと共に、実測の投影データ g の方が大きいとしてもその差分が予め定められた値以下のデータ、つまり実測の投影データ g −仮投影データ g_v が予め定められた値以下のデータについては、予め、実測の投影データ g の値を、その仮投影データ g_v の値に置換えておけばよい。また、線減弱係数の大きい欠陥の欠陥比率断層像の生成では、逆に、欠陥を含まない場合の仮投影データ g_v より実測の投影データ g の方が大きいデータと共に、実測の投影データ g の方が小さいとしてもその差分が予め定められた値以下のデータ、つまり仮投影データ g_v −実測の投影データ g が予め定められた値以下のデータについては、予め、実測の投影データ g の値を、その仮投影データ g_v の値に置換えておけばよい。このようにして、実測の投影データ $g(\text{no}_s, 1) \sim g(\text{no}_s, \text{num}_d)$ において、欠陥を含まない場合の仮投影データとの差分が予め定められた値より大きい信頼性の高いデータのみを残して、信頼性の高い投影データのみに基づいてノイズの少ない欠陥比率断層像を生成することができる。但し、予め定められた値を大きな値に設定してしまうと、換言すると実測の投影データの仮投影データとの差分を過剰に0にしてしまうと、

図2に示した厚さが薄い面状の欠陥61や面状でなくとも小さな欠陥61の検出が困難になる場合があるため注意する。

[0171] 実測の投影データ $g(\text{no_s}, 1) \sim g(\text{no_s}, \text{num_d})$ において、欠陥を含まない場合の仮投影データとの差分が予め定められた値より大きいデータのみを残した後、シンプルに、残った、仮投影データとの差分が0ではない各投影データに対応する放射線Rの経路（夫々のスキャンno_sにおいて、線源64から放射された放射線Rの、差分が0ではない各投影データに対応する検出器no_dに至る経路）の交差する領域や密集する領域に欠陥があると見做して、欠陥の3次元位置、形状、及び大きさを特定してもよい。但し、この方法の場合、実測の各投影データにおいて確実にノイズを消さないと、具体的にはノイズの仮投影データとの差分を確実に0にしないと、ノイズに対応する経路の多数の交差領域や密集領域を多数の間違った欠陥として特定してしまうことがある。しかしながら、予め定められた値を各投影データにおいて確実にノイズを消すことができる大きな値に設定すると、図2に示した厚さが薄い面状の欠陥61による差分や面状でなくとも小さな欠陥61による差分（実測の投影データの欠陥を含まない場合の仮投影データとの差分）も消えてしまい、欠陥の検出が困難になり得る。つまり、この方法の場合、実測の各投影データにおいてノイズの（仮投影データとの）差分と欠陥の差分との大きさが明確に異なり、予め定められた値によって確実にノイズの差分を消して欠陥の差分を残せないと間違った欠陥検出若しくは欠陥の未検出が発生し得る。

[0172] 上記各例示的实施形態のように、各投影方向の実測の投影データと欠陥を含まない場合の仮投影データとの差分が整合するように欠陥比率断層像を生成して欠陥特定する方法（上記説明した予め定められた値によってノイズ減らす方法も含む）によって、各投影データのみではノイズとの区別困難な欠陥（厚さが薄い面状欠陥や小さな欠陥）でも、それらの投影データを整合させた欠陥比率断層像においては、ノイズと明確に欠陥比率及び大きさの異なる領域として顕在化させて特定することができる。また、欠陥の3次元的な形状も顕在化させることができる。また、放射線を複数の異なる方向から検

査対象物に照射して投影データを取得し、検査対象物の断層像を生成して欠陥を検出する従来の技術と比べ、上記各例示的实施形態のように、各投影方向の実測の投影データと仮投影データとの差分が整合するように欠陥を特定する方法によって、少ない数や、投影方向が制限された投影データからでも欠陥を精度良く検出することができる。特に厚さが薄い面状欠陥や小さな欠陥でも投影データの差分に基づき精度良く検出することができる。

[0173] 上述したように、投影データには、放射線源から放射され検査対象物を通過して減弱した直接線のみでなく、直接線が減弱する際に、その減弱した内の一部が新たな放射線として発生した散乱線も含まれる。特にコーンビーム方式の場合に多く含まれる。従って、上記各例示的实施形態において散乱線も考慮して欠陥比率断層像を生成することが好ましい。夫々の散乱角度の散乱線の発生確率は $p_s(\text{no_e_in}, \text{no_e_out}, \text{no_th})$ で表せる。 no_e_in が入射する放射線のエネルギー、 no_e_out が散乱線のエネルギー、 no_th が入射する放射線の方向（以下、入射方向という）に対する散乱線の方向の角度（以下、散乱角度という）を表し、発生確率 p_s は、エネルギー no_e_in の放射線が単位走行距離だけ通過する際に、エネルギー no_e_out の散乱線を、通過する方向に対して no_th の角度に発生する確率を表す。なお、本例示的实施形態では入射する放射線のエネルギー no_e_in 、散乱線のエネルギー no_e_out および散乱角度 no_th を離散的に扱うため、番号で表している。図15に入射方向を太い実線の矢印、散乱線の方向を細い実線の矢印、散乱角度を θ 、散乱線の方向を入射方向と直角な面（xy面）に投影した方向を細い波線の矢印、入射方向と直角なxy面に投影した散乱線の方向のx軸（正の向き）とのなす角度を ϕ で表す。図15に示すように、散乱角度 θ は入射方向をz軸（正の向き）とした3次元の極座標における極角（天頂角）であり、角度 ϕ は方位角（偏角）である。角度 ϕ に対して発生確率 p_s は等確率である。

[0174] 放射線が検査対象物を通過する際に、光電効果、干渉性散乱（トムソン散乱）、非干渉性散乱（コンプトン散乱）、電子対生成といった、夫々の相互作用が起きる確率は放射線のエネルギーに依って変化する。また、相互作用

の種類によって、散乱線の角度分布、つまり夫々の角度に散乱する確率は異なる。そこで、本例示的实施形態では、エネルギー no_e_in によって変化する夫々の相互作用による、散乱角度 no_th の散乱線の発生確率の総和を $p_s(no_e_in, no_e_out, no_th)$ として表す。つまり、各エネルギー no_e_in において、夫々の相互作用による散乱線の発生確率の総和を一つの関数 $p_s(no_e_in, no_e_out, no_th)$ として表す。また、相互作用の種類に依っては散乱の前後でエネルギーが変化する。例えば干渉性散乱の場合、入射する放射線のエネルギーと散乱線のエネルギーは同じだが、非干渉性散乱の場合、入射する放射線のエネルギーと散乱線のエネルギーは異なり、散乱角度に依って散乱線のエネルギーは異なる。そこで、本例示的实施形態では、散乱線の発生確率 p_s を入射する放射線のエネルギー no_e_in と散乱線のエネルギー no_e_out の関数とする。なお、散乱線の発生確率 p_s は検査対象物に含まれる部材に依って異なるため、本例示的实施形態では部材毎に発生確率 p_s をもつこととする。散乱線の発生確率 p_s は部材毎に夫々のエネルギー no_e_out の夫々の角度 no_th の散乱線の強度を実際に測定して求めてもよいし、理論的に求めてもよい。例えば、非干渉性散乱の場合、夫々の角度に散乱する確率はクライナー仁科の公式によって計算することができる。散乱線の発生確率 p_s は何れの手段によって与えられてもよい。例えば3次元(no_e_in, no_e_out, no_th)のテーブルによって与えられてもよいし、 no_e_in, no_e_out, no_th の3変数を引数とする関数によって与えられてもよい。また、本例示的实施形態では、夫々の相互作用による散乱線の発生確率の総和を一つの関数 p_s として表す事としたが、夫々のエネルギー no_e_in において、夫々の相互作用の起きる確率と、夫々の相互作用が起きた場合に夫々のエネルギー no_e_out で夫々の角度 no_th に散乱する確率の組合せによって与えられてもよい。

[0175] 散乱の計算は計算量が多く時間が掛かる。本例示的实施形態では、撮影位置特定ステップが完了して検査対象物に対して各投影データの撮影位置が定まり、欠陥特定処理の初めに各種テーブルを生成した後に散乱の計算を実施する。検査対象物の形状情報 $no_f(no_pix)$ により各ボクセルの部材が分かる

ため、各ボクセルに該当する部材の散乱線発生確率 p_s を割り当てて散乱の計算を実施することができる。散乱の計算では、検査対象物の形状情報 $no_f(no_pix)$ 及び各部材の散乱線発生確率 p_s と、検査対象物に対する夫々の投影データの撮影位置に基づき散乱線の投影データを $g_s(1, 1) \sim g_s(num_s, num_d)$ として生成する。そして、実測の投影データ $g(1, 1) \sim g(num_s, num_d)$ から、計算した散乱線の投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(num_s, num_d)$ を差引いて、実測の直接線のみを投影データを $g_p(1, 1) \sim g_p(num_s, num_d)$ として求める。なお、 num_s はスキャンの数（投影方向の数）を表す。そして、図12または図14に示した欠陥特定処理において、実測の投影データ $g(no_s, 1) \sim g(no_s, num_d)$ の代わりに、直接線のみを投影データ $g_p(1, 1) \sim g_p(num_s, num_d)$ を用いて欠陥比率断層像を生成する。検査対象物に含まれる内部欠陥は僅かであり、検査対象物によって発生する散乱線に内部欠陥が及ぼす影響は小さい。従って、検査対象物に対して夫々の投影データの撮影位置が定まった段階で一度、散乱の計算を実施すればよい。

[0176] 各ボクセルの散乱線発生確率 $p_s(no_e_in, no_e_out, no_th)$ に基づき、散乱を計算し、散乱線の投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(num_s, num_d)$ を生成する方法を説明する。散乱の計算方法として、1回目の散乱（以下、1次散乱という）のみ計算し、多重散乱（2回目、3回目、・・・の散乱）は計算しない場合、以下のようにして散乱線の投影データ g_s を生成できる。スキャン no_s の検出器 no_d に入射する経路 no_path の通過する、 no_pix_path 番目のボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)$ に着目する。ボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)$ において、経路 no_path のエネルギー no_e の放射線の減弱の際に発生する散乱線の強度を $I_pix_out(no_e_out, no_th)$ として、下記（9）式で与えられる。

$$I_pix_out(no_e_out, no_th) = I_pix(no_e) \times plen_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path) \times p_s(no_e, no_e_out, no_th) \quad \dots (9)$$

[0177] 上記（9）式において、 $I_pix(no_e)$ は、経路 no_path のエネルギー no_e の

放射線のボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)$ に入射する際の強度を表す。(9)式の $I_pix_out(no_e_out, no_th)$ は、入射強度 $I_pix(no_e)$ の放射線が経路 no_path に沿って経路長 $plen_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)$ だけ通過して減弱する際に、経路 no_path の入射方向に対して各散乱角度 no_th で各エネルギー no_e_out で散乱する確率 $p_s(no_e, no_e_out, no_th)$ に従って散乱する強度を表す。上記(9)式において散乱角度 no_th は、経路 no_path の入射方向に対する極角(天頂角)であることに注意する。(9)式において散乱確率 $p_s(no_e, no_e_out, no_th)$ は方位角(偏角)に対して等確率であり、その結果、散乱強度 $I_pix_out(no_e_out, no_th)$ は方位角(偏角)に対して同じ強度となる。なお、エネルギー no_e の入射放射線に対して(9)式により散乱強度 $I_pix_out(no_e_out, no_th)$ を計算する際に、散乱の確率 $p_s(no_e, no_e_out, no_th)$ がゼロとなる no_e_out, no_th の組合せについては計算を省略してもよい。(9)式によって夫々のエネルギー no_e_out で夫々の散乱角度 no_th の散乱線の強度 $I_pix_out(no_e_out, no_th)$ を求めた後に、ボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)$ における経路 no_path と、スキャン no_s の夫々の検出器 $1 \sim num_d$ の位置関係に基づく幾何学的な計算によって、検出器 $1 \sim num_d$ のうち、夫々の散乱線が入射する検出器を特定することができる(夫々の散乱線が多重散乱(2回目以降の散乱)しないことを前提とする)。また、同様に幾何学的な計算によって、夫々の散乱線がボクセル $no_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)$ における経路 no_path から散乱角度 no_th で発生した後に検出器に至るまでに通過するボクセルとそれらボクセルにおける経路長を求めることができるため、通過する夫々のボクセルの夫々のエネルギー no_e_out における減弱係数と経路長に基づき、夫々のエネルギー no_e_out で夫々の散乱角度 no_th で発生した散乱線が減弱して検出器に入射する際の強度を求めることができる。なお、コーンビーム方式の場合、検出器 no_d に入射する直接線の経路において発生する散乱線は検出器 $1 \sim num_d$ の全てで検出され得るが、例えばペンシルビーム方式の場合は、検出器 no_d のみで検出され得る。ファンビーム方式の場合は

、検出器no_dの属する1次元に配置された検出器でのみ検出され得る。このようにスキャン方式によって検出され得る検出器が限定されることを踏まえ、検出器no_dに入射する直接線の経路において発生する散乱線が入射する検出器を特定する際に、検出器番号no_dに基づいて散乱線が検出され得る検出器を限定した上で特定する。以上説明した計算によって、スキャンno_sの検出器no_dに入射する経路no_pathの通過するno_pix_path番目のボクセルno_pix(no_s, no_d, no_path, no_pix_path)において、経路no_pathのエネルギーno_eの放射線の減弱の際に発生する散乱線が夫々の検出器に入射する強度を求める事ができる。同様にして、全部のエネルギー1~num_eについて計算し、全部のボクセル1~num_pix(no_s, no_d, no_path)について計算し、全部の経路1~num_path(no_s, no_d)について計算し、全部の検出器1~num_dについて計算することができる。以上の計算によって、夫々のエネルギー1~num_eにおいて、スキャンno_sの各検出器1~num_dに入射する散乱線の強度の総和を求めることができる。そしてスキャンno_sの各検出器1~num_dについて、夫々のエネルギーにおける散乱線の強度を夫々のエネルギーを乗じた上で足し合わせる事により、検出される強度、つまり投影データ $g_s(\text{no}_s, 1) \sim g_s(\text{no}_s, \text{num}_d)$ を生成することができる（上記（1）式や（4）式参照）。なお、各エネルギーにおける散乱線の強度を足し合わせる際に、検出器の検出効率を反映してもよい（上記（1__5）式や（4__5）式参照）。同様にして、全部のスキャンの投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(\text{num}_s, \text{num}_d)$ を生成することができる。なお、直接線の経路上で発生する夫々の散乱線が入射する検出器や、夫々の散乱線が検出器に至るまでに通過するボクセルやそれらボクセルにおける経路長など、事前に求めてテーブル化しておいてもよい。以上説明した方法によって1次散乱線のみを投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(\text{num}_s, \text{num}_d)$ を生成することができるが、夫々のスキャンの投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(1, \text{num}_d)$ 、 $g_s(2, 1) \sim g_s(2, \text{num}_d) \dots$ について、スキャンごとにぼかす事により仮想的に多重散乱線（2回目、3回目……の散乱線）の投影データを生成して、元の投影データに足し合わせることに

より、 $g_s(1, 1) \sim g_s(\text{num}_s, \text{num}_d)$ を1次散乱線+多重散乱線の投影データに変換しても良い。

尚、投影データのぼかす程度はスキャン方式によって異なる。例えばファンビーム方式の場合、夫々のスキャンにおいて、検出器1～ num_d の2次元の投影データに対して同一のビーム（線源）に対応する1次元の方向にそれと直交する方向より強めにぼかす。ここで、夫々の1次元のデータは異なるビームによって発生した1次散乱線のデータではあるが、特にビームが近いデータ同士は、夫々、近似的に同じビームによって発生した1次散乱線のデータと見做して、1次元の方向と直交する方向にもぼかす（2次元的にぼかす）こととする。またペンシルビーム方式の場合は夫々のスキャンにおいて、検出器1～ num_d の2次元の投影データに対して2次元的にコーンビーム方式やファンビーム方式の場合より弱めにぼかす。ここで、1個1個のデータは異なるビームによって発生した1次散乱線のデータではあるが、特にビームが近いデータ同士は、夫々、近似的に同じビームによって発生した1次散乱線のデータと見做して、2次元的にぼかすこととする。

[0178] 各ボクセルの散乱線発生確率 $p_s(\text{no}_e_in, \text{no}_e_out, \text{no}_th)$ に基づき、1次散乱のみでなく、多重散乱も含めて計算して投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(\text{num}_s, \text{num}_d)$ を生成する方法を説明する。多重散乱も含める場合、モンテカルロシミュレーションによって投影データを生成することができる。具体的には、線源64から各方向に夫々のエネルギー no_e の放射線の光子を多数放射し、光子1つ1つについて、各ボクセル74の線減弱係数と散乱線発生確率 $p_s(\text{no}_e_in, \text{no}_e_out, \text{no}_th)$ に基づき、自由行程長ずつ進ませる度に直進させるか、吸収させるか、散乱させるかを逐次判定する。散乱させる場合には、どの方向に散乱させるかを判定することを、光子が検出器68に至るまで繰り返すことにより投影データ $g_s(1, 1) \sim g_s(\text{num}_s, \text{num}_d)$ を生成することができる。なお、ペンシルビーム方式、ファンビーム方式、及びコーンビーム方式等のスキャン方式によって線源64及び、散乱線が検出され得る検出器68の設定が異なることを留意する。

[0179] 上述した各例示的实施形態では、撮影位置特定処理、及び欠陥特定処理共に検査対象物60の領域以外の領域（検査対象物60の外の領域）における放射線Rの減弱を考慮しなかった。検査対象物60の外の領域は検査対象物60が存在する環境に応じた物質で満たされており、その線減弱係数は既知である。また、各撮影位置において、線源64から放射される放射線の各検出器68に入射する各経路70において、線源64から検査対象物60の領域に至るまでの経路長、及び検査対象物60の領域から検出器68に至るまでの経路長は求めることができる。従って、これらの情報から、より正確に仮投影データを求めることができる。例えば、検査対象物60の外の領域が空気に満たされているとして、空気の線減弱係数に基づき、検査対象物60の外の領域における減弱を計算して、より正確に仮投影データを求めることができる。この結果、より正確に撮影位置を特定し、より正確に欠陥比率断層像を生成して欠陥を特定することができる。但し、検査対象物60の外の領域における減弱の計算の有・無が撮影位置の特定、及び欠陥61の特定の正確さに及ぼす影響は僅かと考えられる。

[0180] なお、上記各形態において、例えば、第1取得部40、撮影位置特定部42、第1仮投影データ生成部44、第2取得部50、欠陥特定部52、及び第2仮投影データ生成部54といった各種の処理を実行する処理部（processing unit）のハードウェア的な構造としては、次に示す各種のプロセッサ（processor）を用いることができる。上記各種のプロセッサには、前述したように、ソフトウェア（プログラム）を実行して各種の処理部として機能する汎用的なプロセッサであるCPUに加えて、FPGA（Field Programmable Gate Array）等の製造後に回路構成を変更可能なプロセッサであるプログラマブルロジックデバイス（Programmable Logic Device：PLD）、ASIC（Application Specific Integrated Circuit）等の特定の処理を実行させるために専用に設計された回路構成を有するプロセッサである専用電気回路等が含まれる。

[0181] 1つの処理部は、これらの各種のプロセッサのうちの1つで構成されても

よいし、同種又は異種の2つ以上のプロセッサの組み合わせ（例えば、複数のFPGAの組み合わせや、CPUとFPGAとの組み合わせ）で構成されてもよい。また、複数の処理部を1つのプロセッサで構成してもよい。

[0182] 複数の処理部を1つのプロセッサで構成する例としては、第1に、クライアント及びサーバ等のコンピュータに代表されるように、1つ以上のCPUとソフトウェアの組み合わせで1つのプロセッサを構成し、このプロセッサが複数の処理部として機能する形態がある。第2に、システムオンチップ（System On Chip : SoC）等に代表されるように、複数の処理部を含むシステム全体の機能を1つのIC（Integrated Circuit）チップで実現するプロセッサを使用する形態がある。このように、各種の処理部は、ハードウェア的な構造として、上記各種のプロセッサの1つ以上を用いて構成される。

[0183] 更に、これらの各種のプロセッサのハードウェア的な構造としては、より具体的には、半導体素子などの回路素子を組み合わせた電気回路（circuitry）を用いることができる。

[0184] また、上記各例示的实施形態では、情報処理装置10の記憶部24に撮影位置特定プログラム30及び欠陥特定プログラム32が予め記憶（インストール）されている態様を説明したが、これに限定されない。撮影位置特定プログラム30及び欠陥特定プログラム32の各々は、CD-ROM（Compact Disc Read Only Memory）、DVD-ROM（Digital Versatile Disc Read Only Memory）、及びUSB（Universal Serial Bus）メモリ等の記録媒体に記録された形態で提供されてもよい。また、撮影位置特定プログラム30及び欠陥特定プログラム32の各々は、ネットワークを介して外部装置からダウンロードされる形態としてもよい。

[0185] 以上の記載から、以下の付記に記載の発明を把握することができる。

[0186] [付記1]

少なくとも1つのプロセッサを備え、

前記プロセッサは、

検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも2つの撮影位置

の各々に対応する投影データを取得し、

前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物の形状情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する

情報処理装置。

[0187] [付記 2]

前記減弱情報は、検査対象物に含まれる少なくとも 2 つの部材の各々に応じた減弱情報を含む

付記 1 に記載の情報処理装置。

[0188] [付記 3]

前記減弱情報は、空気の減弱情報を含む

付記 1 または付記 2 に記載の情報処理装置。

[0189] [付記 4]

前記減弱情報は、少なくとも 2 つのエネルギー帯域における減弱情報を含む

付記 1 から付記 3 のいずれか 1 つに記載の情報処理装置。

[0190] [付記 5]

前記プロセッサは、

前記欠陥の減弱情報を取得し、

前記欠陥の減弱情報に基づいて前記欠陥を特定する

付記 1 から付記 4 のいずれか 1 つに記載の情報処理装置。

[0191] [付記 6]

前記プロセッサは

前記形状情報に基づいた前記検査対象物の 3 次元空間における分布において、前記検査対象物の部材の無い領域と、前記検査対象物の部材の有る領域とを区別して前記欠陥を特定する

付記 1 から付記 5 のいずれか 1 つに記載の情報処理装置。

[0192] [付記 7]

前記プロセッサは

検査対象物に対して放射線を照射した場合に得られる仮投影データを、検査対象物の減弱情報と形状情報とに基づいて生成し、
前記仮投影データに基づいて前記欠陥を特定する
付記 1 から付記 6 のいずれか 1 つに記載の情報処理装置。

[0193] [付記 8]

前記プロセッサは、
前記投影データにおいて、前記仮投影データとの大小関係が異なるデータを区別して前記欠陥を特定する
付記 7 に記載の情報処理装置。

[0194] [付記 9]

前記プロセッサは、
前記投影データにおいて、前記仮投影データとの差分の大きさが異なるデータを区別して前記欠陥を特定する
付記 7 に記載の情報処理装置。

[0195] [付記 10]

前記プロセッサは、
前記検査対象物の散乱の情報に基づいて前記欠陥を特定する
付記 1 から付記 9 のいずれか 1 つに記載の情報処理装置。

[0196] [付記 11]

検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも 2 つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、
前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物の形状情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する
処理をプロセッサが実行する情報処理方法。

[0197] [付記 12]

検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも 2 つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、
前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物の形状

情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する

処理をプロセッサに実行させるための情報処理プログラム。

- [0198] 2023年1月23日付け日本出願：特願2023-008366の開示は、その全体が参照により本明細書に取り込まれる。
- [0199] 本明細書に記載された全ての文献、特許出願、および技術規格は、個々の文献、特許出願、および技術規格が参照により取り込まれることが具体的かつ個々に記された場合と同程度に、本明細書中に参照により取り込まれる。

請求の範囲

- [請求項1] 少なくとも1つのプロセッサを備え、
 前記プロセッサは、
 検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも2つの撮
 影位置の各々に対応する投影データを取得し、
 前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物
 の形状情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する
 情報処理装置。
- [請求項2] 前記減弱情報は、検査対象物に含まれる少なくとも2つの部材の各
 々に応じた減弱情報を含む
 請求項1に記載の情報処理装置。
- [請求項3] 前記減弱情報は、空気の減弱情報を含む
 請求項1に記載の情報処理装置。
- [請求項4] 前記減弱情報は、少なくとも2つのエネルギー帯域における減弱情
 報を含む
 請求項1に記載の情報処理装置。
- [請求項5] 前記プロセッサは、
 前記欠陥の減弱情報を取得し、
 前記欠陥の減弱情報に基づいて前記欠陥を特定する
 請求項1に記載の情報処理装置。
- [請求項6] 前記プロセッサは、
 前記形状情報に基づいた前記検査対象物の3次元空間における分布
 において、前記検査対象物の部材の無い領域と、前記検査対象物の部
 材の有る領域とを区別して前記欠陥を特定する
 請求項1に記載の情報処理装置。
- [請求項7] 前記プロセッサは、
 検査対象物に対して放射線を照射した場合に得られる仮投影デー
 タを、検査対象物の減弱情報と形状情報とに基づいて生成し、

前記仮投影データに基づいて前記欠陥を特定する
請求項 1 に記載の情報処理装置。

[請求項8]

前記プロセッサは、
前記投影データにおいて、前記仮投影データとの大小関係が異なるデータを区別して前記欠陥を特定する
請求項 7 に記載の情報処理装置。

[請求項9]

前記プロセッサは、
前記投影データにおいて、前記仮投影データとの差分の大きさが異なるデータを区別して前記欠陥を特定する
請求項 7 に記載の情報処理装置。

[請求項10]

前記プロセッサは、
前記検査対象物の散乱の情報に基づいて前記欠陥を特定する
請求項 1 に記載の情報処理装置。

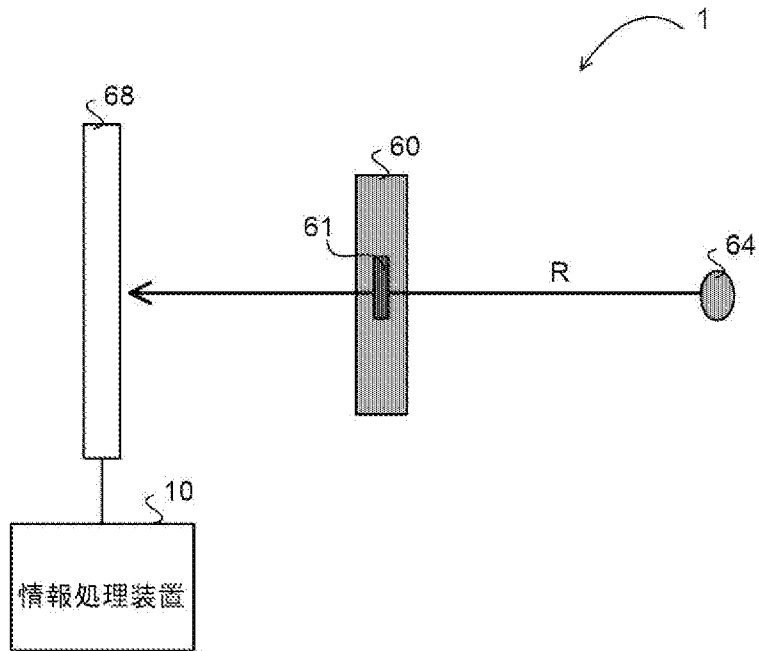
[請求項11]

検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも 2 つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、
前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物の形状情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する
処理をプロセッサが実行する情報処理方法。

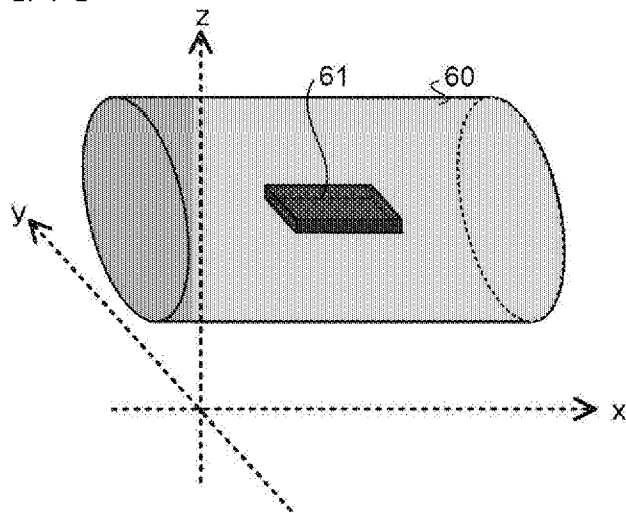
[請求項12]

検査対象物に対して放射線の照射方向が異なる少なくとも 2 つの撮影位置の各々に対応する投影データを取得し、
前記投影データと、前記検査対象物の減弱情報と、前記検査対象物の形状情報とに基づいて前記検査対象物の欠陥を特定する
処理をプロセッサに実行させるための情報処理プログラム。

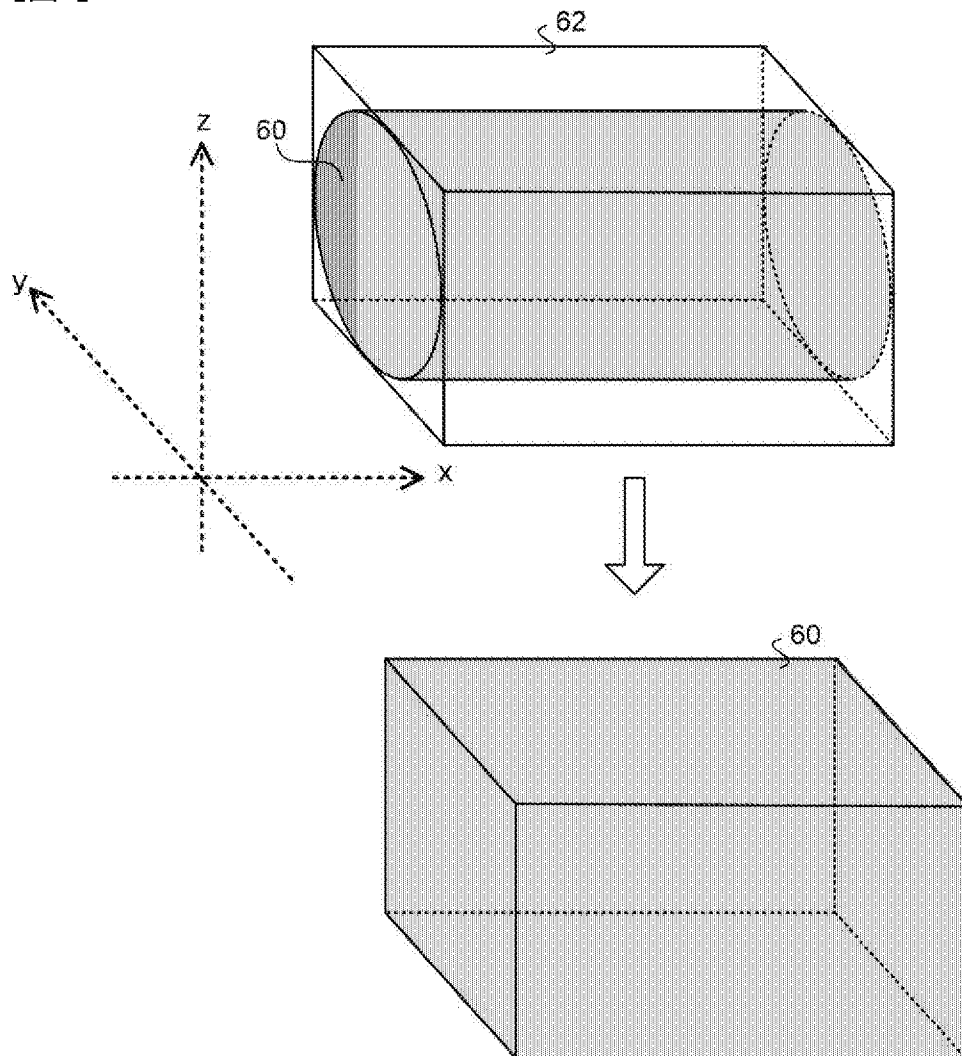
[図1]



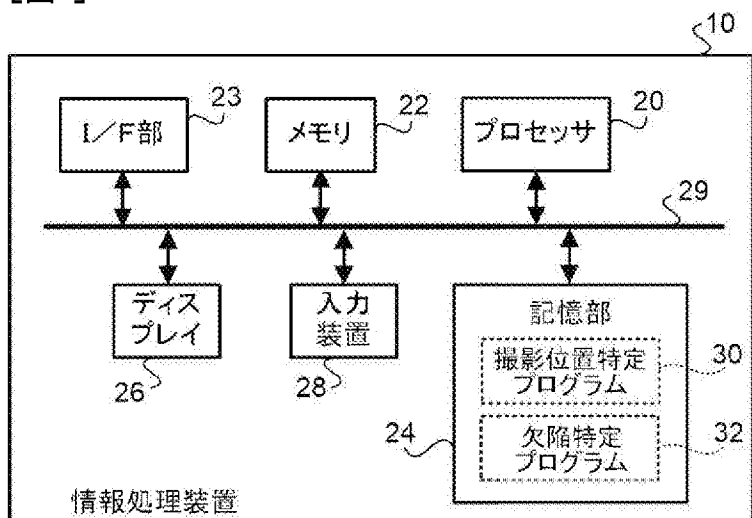
[図2]



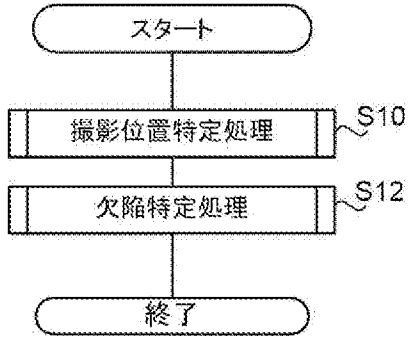
[図3]



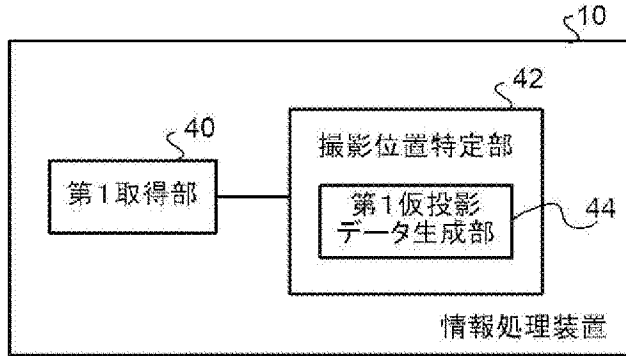
[図4]



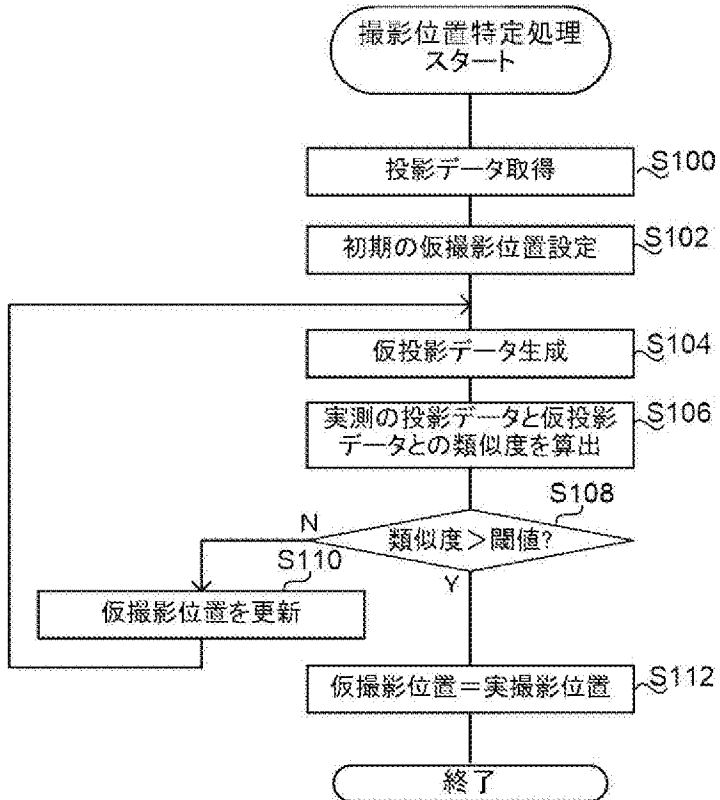
[図5]



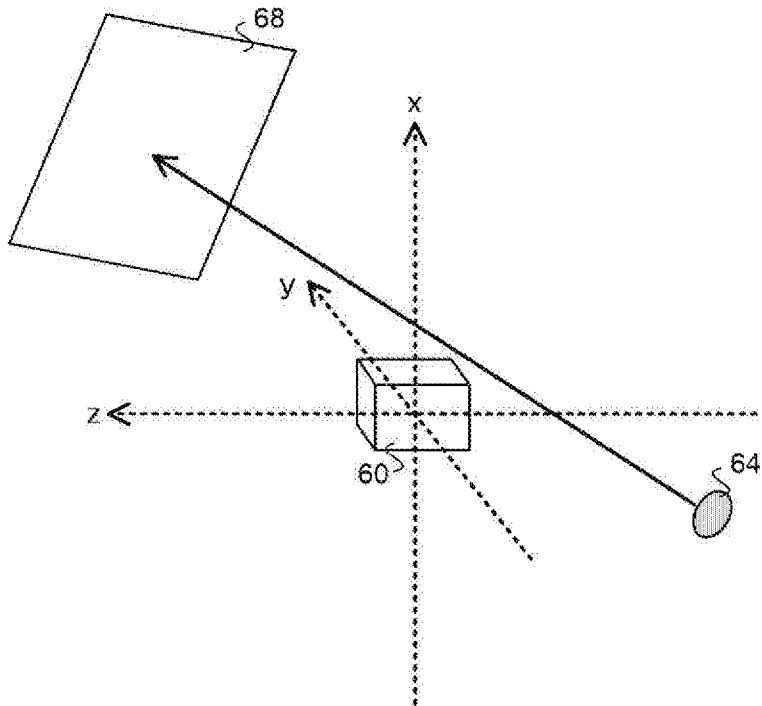
[図6]



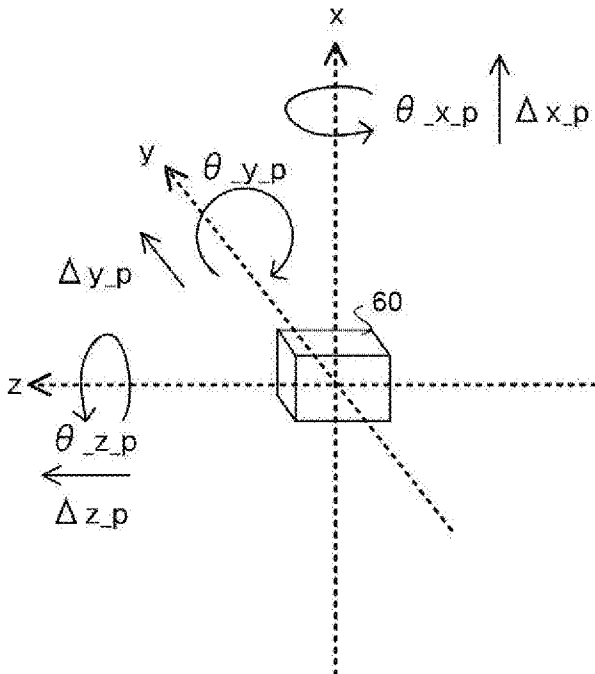
[図7]



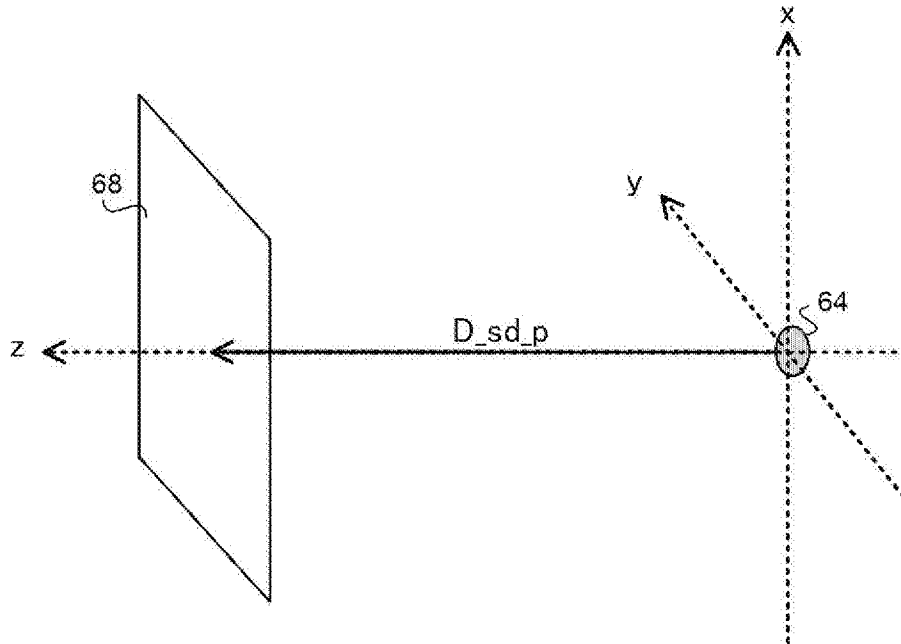
[図8A]



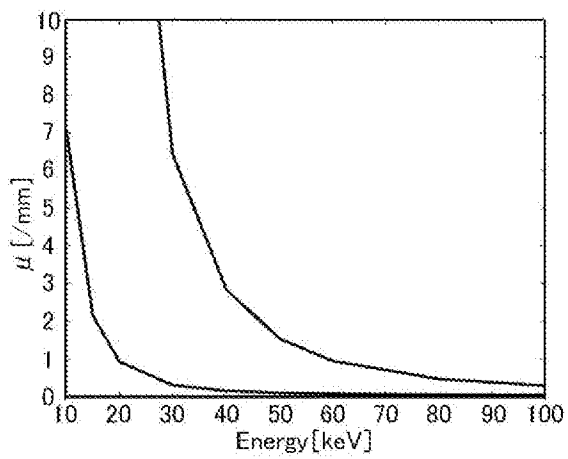
[図8B]



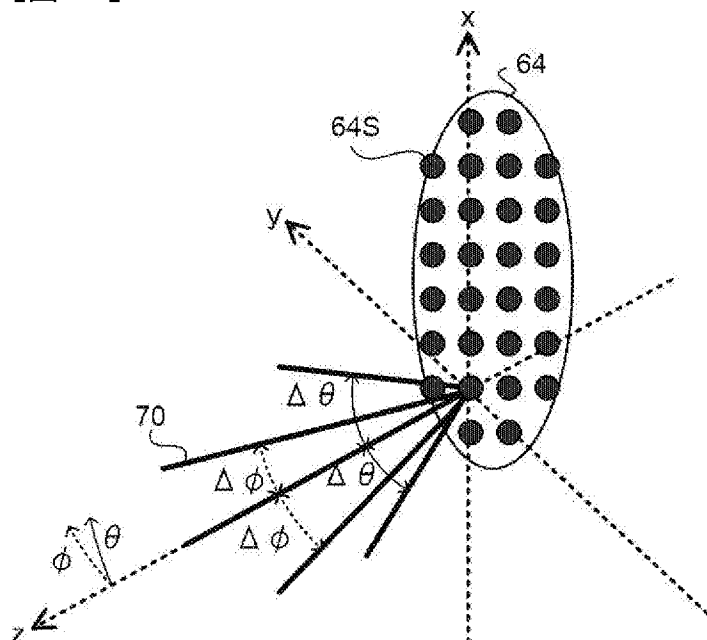
[図8C]



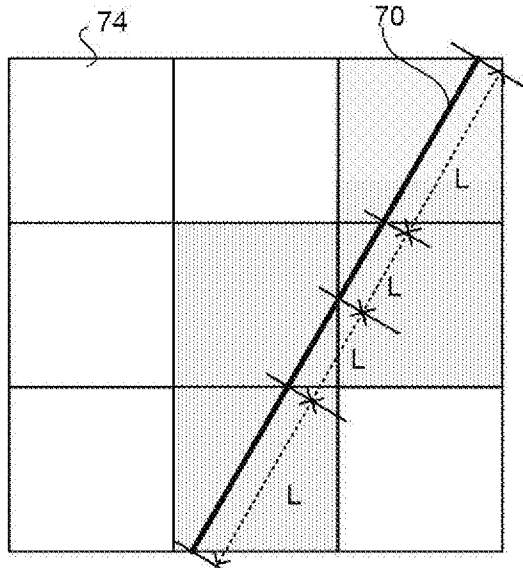
[図9]



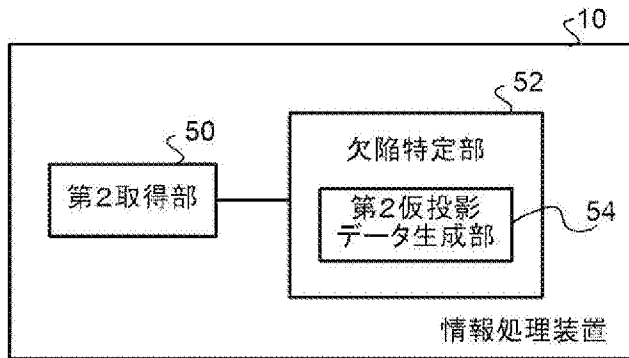
[図10A]



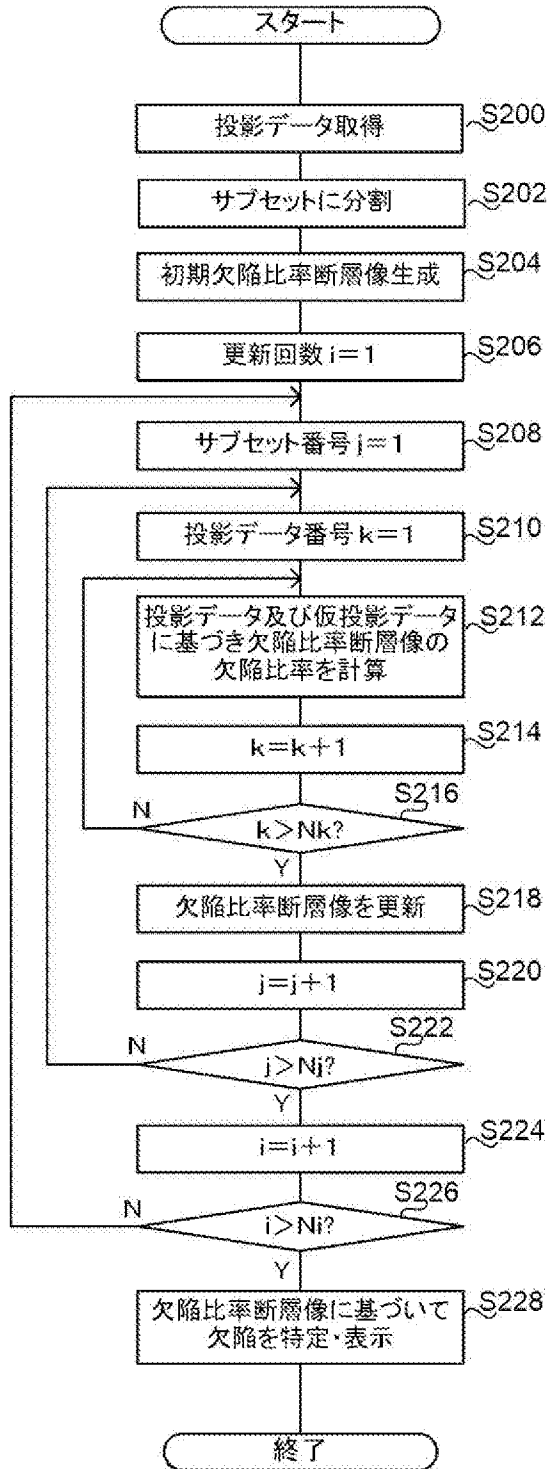
[図10B]



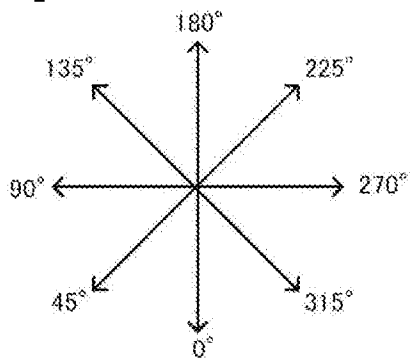
[図11]



[図12]

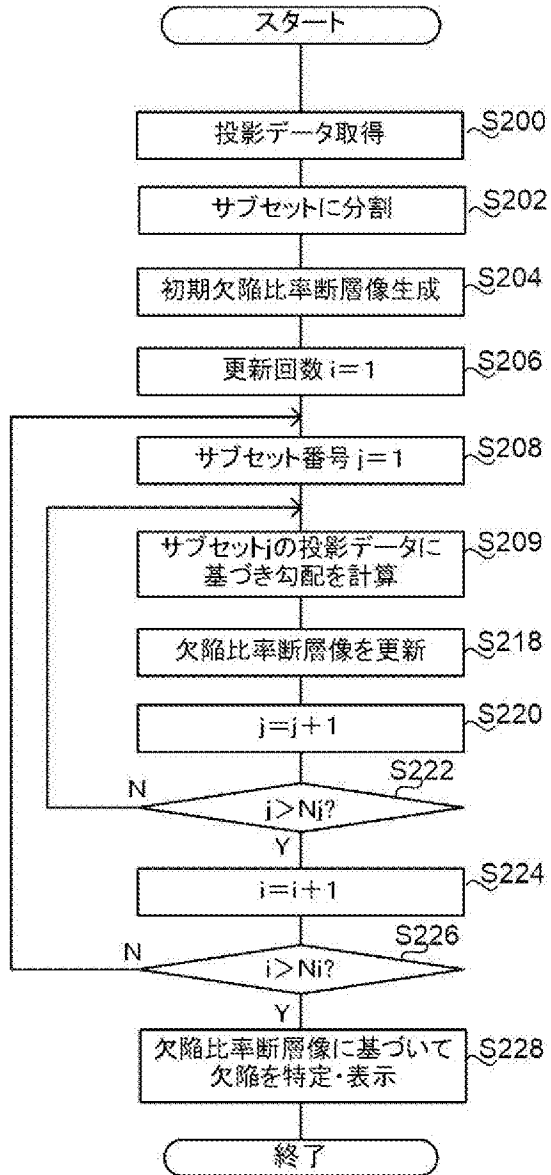


[図13]

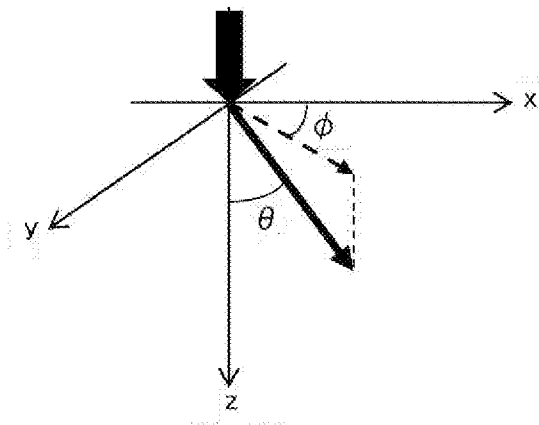


投影角度	スキャン番号	サブセット数 1		サブセット数 2		サブセット数 4	
		サブセット番号	投影データ番号	サブセット番号	投影データ番号	サブセット番号	投影データ番号
0°	1	1	1	1	1	1	1
45°	2	1	2	2	1	3	1
90°	3	1	3	1	2	2	1
135°	4	1	4	2	2	4	1
180°	5	1	5	1	3	1	2
225°	6	1	6	2	3	3	2
270°	7	1	7	1	4	2	2
315°	8	1	8	2	4	4	2

[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/000433

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>G01N 23/18</i> (2018.01)i; <i>G01N 23/046</i> (2018.01)i; <i>G01N 23/087</i> (2018.01)i FI: G01N23/18; G01N23/046; G01N23/087		
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) G01N23/00-23/2276: A61B6/00-6/58		
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 1971-2024 Registered utility model specifications of Japan 1996-2024 Published registered utility model applications of Japan 1994-2024		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2014-62743 A (HITACHI, LTD.) 10 April 2014 (2014-04-10) claim 1, paragraphs [0012]-[0037], fig. 1-3, 6, 12-15	1-9, 11-12
Y		10
Y	JP 2013-205267 A (HITACHI-GE NUCLEAR ENERGY, LTD.) 07 October 2013 (2013-10-07) claim 1, paragraph [0009]	10
A	JP 2019-58480 A (HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) 18 April 2019 (2019-04-18) entire text, all drawings	1-12
A	JP 2005-95397 A (GE MEDICAL SYSTEMS GLOBAL TECHNOLOGY CO. LLC) 14 April 2005 (2005-04-14) entire text, all drawings	1-12
A	WO 2015/064446 A1 (HITACHI MEDICAL CORP.) 07 May 2015 (2015-05-07) entire text, all drawings	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 "D" document cited by the applicant in the international application "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 07 March 2024		Date of mailing of the international search report 19 March 2024
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/000433

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2017/0023496 A1 (PRISMATIC SENSORS AB) 26 January 2017 (2017-01-26) entire text, all drawings	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/JP2024/000433

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2014-62743	A	10 April 2014	US 2014/0079180 A1 claim 1, paragraphs [0027]- [0050], fig. 1-3, 6, 9-12 EP 2711695 A1	
JP	2013-205267	A	07 October 2013	(Family: none)	
JP	2019-58480	A	18 April 2019	(Family: none)	
JP	2005-95397	A	14 April 2005	(Family: none)	
WO	2015/064446	A1	07 May 2015	US 2016/0199018 A1 CN 105451659 A	
US	2017/0023496	A1	26 January 2017	WO 2015/156711 A1 EP 3129957 A1 CN 106233335 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01N 23/18(2018.01)i; G01N 23/046(2018.01)i; G01N 23/087(2018.01)i FI: G01N23/18; G01N23/046; G01N23/087		
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）） G01N23/00-23/2276: A61B6/00-6/58 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 1971-2024年 日本国実用新案登録公報 1996-2024年 日本国登録実用新案公報 1994-2024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）		
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
X Y	JP 2014-62743 A (株式会社日立製作所) 10.04.2014 (2014-04-10) 請求項1、段落 [0012] - [0037]、図1-3, 6, 12-15	1-9, 11-12 10
Y	JP 2013-205267 A (日立GEニュークリア・エナジー株式会社) 07.10.2013 (2013-10-07) 請求項1、段落 [0009]	10
A	JP 2019-58480 A (浜松ホトニクス株式会社) 18.04.2019 (2019-04-18) 全文、全図	1-12
A	JP 2005-95397 A (ジーイー・メディカル・システムズ・グローバル・テクノロ ジー・カンパニー・エルエルシー) 14.04.2005 (2005-04-14) 全文、全図	1-12
A	WO 2015/064446 A1 (株式会社日立メディコ) 07.05.2015 (2015-05-07) 全文、全図	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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、一般的な技術水準を示すもの “D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献 “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抵触するものではなく、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 07.03.2024	国際調査報告の発送日 19.03.2024	
名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 田中 洋介 2W 3009 電話番号 03-3581-1101 内線 3258	

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	US 2017/0023496 A1 (PRISMATIC SENSORS AB) 26.01.2017 (2017 - 01 - 26) 全文、全図	1-12

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
 PCT/JP2024/000433

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2014-62743	A	10.04.2014	US	2014/0079180	A1	
					claim 1, pars. [0027]- [0050], figs.1-3,6,9-12		
				EP	2711695	A1	
JP	2013-205267	A	07.10.2013	(ファミリーなし)			
JP	2019-58480	A	18.04.2019	(ファミリーなし)			
JP	2005-95397	A	14.04.2005	(ファミリーなし)			
WO	2015/064446	A1	07.05.2015	US	2016/0199018	A1	
				CN	105451659	A	
US	2017/0023496	A1	26.01.2017	WO	2015/156711	A1	
				EP	3129957	A1	
				CN	106233335	A	