

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-96853
(P2021-96853A)

(43) 公開日 令和3年6月24日(2021.6.24)

(51) Int. Cl.	F I			テーマコード (参考)	
G06T 1/00 (2006.01)	G06T	1/00	3 1 5	5 B 0 5 7	
G06T 5/50 (2006.01)	G06T	5/50			

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2020-206124 (P2020-206124)	(71) 出願人	501241645
(22) 出願日	令和2年12月11日 (2020. 12. 11)		学校法人 工学院大学
(31) 優先権主張番号	特願2019-228489 (P2019-228489)		東京都新宿区西新宿 1 丁目 2 4 番 2 号
(32) 優先日	令和1年12月18日 (2019. 12. 18)	(74) 代理人	110001519
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)		特許業務法人太陽国際特許事務所
		(72) 発明者	馬場 則男
			東京都新宿区西新宿 1 - 2 4 - 2 学校法 人工学院大学内
		F ターム (参考)	5B057 BA19 CA08 CA12 CA16 CB08 CB13 CB16 CD14 DB02 DB09

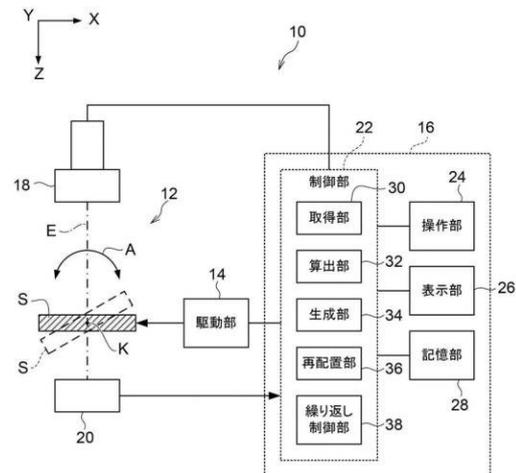
(54) 【発明の名称】 画像処理装置、画像処理方法、及び画像処理プログラム

(57) 【要約】

【課題】単に濃度量子を配置することにより三次元画像を再構成する場合と比較して、精度良く三次元画像を再構成することができる。

【解決手段】画像処理装置 16 は、試料 S に対する複数の角度における複数の第 1 の投影像を取得する取得部 30 と、複数の第 1 の投影像及び再構成像の複数の角度における複数の第 2 の投影像に基づいて誤差分布を算出する算出部 32 と、誤差分布に基づいて、濃度値を量子化した濃度量子を配置することにより再構成像を生成する生成部 34 と、生成された再構成像及び誤差分布に基づいて濃度量子を再配置する再配置部 36 と、を備える。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料に対する複数の角度における複数の第 1 の投影像を取得する取得部と、
 前記複数の第 1 の投影像及び再構成像の前記複数の角度における複数の第 2 の投影像に基づいて誤差分布を算出する算出部と、
 前記誤差分布に基づいて、濃度値を量子化した濃度量子を配置することにより再構成像を生成する生成部と、
 生成された前記再構成像及び前記誤差分布に基づいて前記濃度量子を再配置する再配置部と、
 を備えた画像処理装置。

10

【請求項 2】

前記再配置部は、前記誤差分布に基づいて、前記濃度量子の数が最も多すぎる画素から前記濃度量子の数が最も少なすぎる画素に前記濃度量子を移動させることにより、前記濃度量子を再配置する
 請求項 1 記載の画像処理装置。

【請求項 3】

前記再構成像の解像度を段階的に高くしながら、前記算出部、前記生成部、及び前記再配置部による処理が繰り返されるように制御する繰り返し制御部
 を備えた請求項 1 又は請求項 2 記載の画像処理装置。

20

【請求項 4】

コンピュータが、
 試料に対する複数の角度における複数の第 1 の投影像を取得するステップと、
 前記複数の第 1 の投影像及び再構成像の前記複数の角度における複数の第 2 の投影像に基づいて誤差分布を算出するステップと、
 前記誤差分布に基づいて、濃度単位を表す濃度量子を配置することにより再構成像を生成するステップと、
 生成された前記再構成像及び前記誤差分布に基づいて前記濃度量子を再配置するステップと、
 を含む処理を実行する画像処理方法。

30

【請求項 5】

コンピュータを、請求項 1 ~ 3 の何れか 1 項に記載の画像処理装置の各部として機能させるための画像処理プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、画像処理装置、画像処理方法、及び画像処理プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 及び非特許文献 1 には、試料を投影した投影像に基づいて試料の三次元画像を再構成する技術が開示されている。この技術では、濃度値を量子化した濃度量子を配置することにより試料の三次元画像を再構成している。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】特許第 5 4 2 7 1 3 3 号公報

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献 1】「濃度量子を用いた非線形再構成法」、馬場則男、金子賢治：顕微鏡、5 3 巻、2 0 1 8

【発明の概要】

50

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、上記従来技術では、再構成した三次元画像に筋状の偽像が発生する場合があります。精度良く三次元画像を再構成することができない場合があった。

【0006】

本発明は、単に濃度量子を配置することにより三次元画像を再構成する場合と比較して、精度良く三次元画像を再構成することができる画像処理装置、画像処理方法、及び画像処理プログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するため、第1態様に係る画像処理装置の発明は、試料に対する複数の角度における複数の第1の投影像を取得する取得部と、前記複数の第1の投影像及び再構成像の前記複数の角度における複数の第2の投影像に基づいて誤差分布を算出する算出部と、前記誤差分布に基づいて、濃度値を量子化した濃度量子を配置することにより再構成像を生成する生成部と、生成された前記再構成像及び前記誤差分布に基づいて前記濃度量子を再配置する再配置部と、を備える。

【0008】

第2態様に係る画像処理装置の発明は、前記再配置部は、前記誤差分布に基づいて、前記濃度量子の数が最も多すぎる画素から前記濃度量子の数が最も少なすぎる画素に前記濃度量子を移動させることにより、前記濃度量子を再配置する。

【0009】

第3態様に係る画像処理装置の発明は、前記再構成像の解像度を段階的に高くしながら、前記算出部、前記生成部、及び前記再配置部による処理が繰り返されるように制御する制御部を備える。

【0010】

第4態様に係る画像処理方法の発明は、コンピュータが、試料に対する複数の角度における複数の第1の投影像を取得するステップと、前記複数の第1の投影像及び再構成像の前記複数の角度における複数の第2の投影像に基づいて誤差分布を算出するステップと、前記誤差分布に基づいて、濃度単位を表す濃度量子を配置することにより再構成像を生成するステップと、生成された前記再構成像及び前記誤差分布に基づいて前記濃度量子を再配置するステップと、を含む処理を実行する。

【0011】

第5態様に係る画像処理プログラムの発明は、コンピュータを、第1～3の何れかの態様に記載の画像処理装置の各部として機能させるためのプログラムである。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、単に濃度量子を配置することにより三次元画像を再構成する場合と比較して、精度良く三次元画像を再構成することができる、という効果を有する。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】三次元画像再構成システムの構成図である。

【図2】画像処理のフローチャートである。

【図3】濃度量子の再配置について説明するための図である。

【図4】解像度を段階的に高にした場合の再構成像の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、本発明の実施形態について説明する。

【0015】

図1には、本実施の形態に係る三次元画像再構成システム10の構成を示した。図1に示すように、三次元画像再構成システム10は、透過型電子顕微鏡(Transmiss

10

20

30

40

50

ion Electron Microscope: TEM) 12、駆動部 14、及び画像処理装置 16 を備えている。

【0016】

透過型電子顕微鏡 12 は、特許文献 1 に記載の透過型電子顕微鏡と同様の構成であり、電子線 E を放出する電子銃 18 及び電子線 E が照射された試料 S の投影像を検出する画像検出器 20 を含む。また、透過型電子顕微鏡 12 は、照射レンズ系及び対物レンズ系等の各種レンズ系を有するが、説明を簡単にするために図示は省略する。

【0017】

駆動部 14 は、試料 S を把持する図示しないホルダを、図 1 において Y 軸に沿った方向を傾斜軸 K として矢印 A 方向に回転させる。これにより、試料 S に対して複数の照射角度で電子線 E を照射することができる。

10

【0018】

本実施形態では、試料 S の形状が平板状であり、図 1 において実線で示す試料 S の位置が初期位置であるものとする。そして、試料 S の初期位置にある場合を試料 S の傾斜角度が 0 度であるものとし、試料 S を右回りに回転させた場合の初期位置に対する試料 S の傾斜角度をプラス方向の傾斜角度とし、試料 S を左回りに回転させた場合の初期位置に対する試料 S の傾斜角度をマイナス方向の傾斜角度とする。

【0019】

本実施形態では、例えば予め定めた傾斜角度範囲で予め定めた単位角度ずつ試料 S を傾斜させて試料 S を撮影し、複数の投影像を得る。傾斜角度範囲及び単位角度は、試料 S の三次元画像を再構成する際に求められる精度等に応じて適宜設定される。傾斜角度範囲は、試料 S を可能な限り傾斜させることができる範囲に設定され、一例として -70 度 ~ +70 度の範囲に設定される。また、単位角度は、数度 ~ 数十度に設定され、一例として 10 度に設定される。なお、傾斜角度範囲及び単位角度は、一例であり、これに限られるものではない。

20

【0020】

画像処理装置 16 は、制御部 22、操作部 24、表示部 26、及び記憶部 28 を備える。

【0021】

制御部 22 は、図 1 に示すように、機能的には、取得部 30、算出部 32、生成部 34、再配置部 36、及び繰り返し制御部 38 を備える。

30

【0022】

取得部 30 は、試料 S に対する複数の角度における複数の第 1 の投影像を取得する画像検出器 20 から取得する。具体的には、取得部 30 は、試料 S に対して複数の照射角度で電子線 E を照射することにより得られた複数の第 1 の投影像を画像検出器 20 から取得する。

【0023】

算出部 32 は、複数の第 1 の投影像及び再構成像の複数の角度における複数の第 2 の投影像に基づいて誤差分布を算出する。具体的には、算出部 32 は、複数の第 1 の投影像及び再構成像を複数の照射角度で投影した場合における複数の第 2 の投影像に基づいて誤差分布を算出する。

40

【0024】

生成部 34 は、算出部 32 が算出した誤差分布に基づいて、濃度値を量子化した濃度量子を配置することにより再構成像を生成する。

【0025】

再配置部 36 は、生成部 34 により生成された再構成像及び誤差分布に基づいて濃度量子を再配置する。具体的には、再配置部 36 は、誤差分布に基づいて、濃度量子の数が最も多すぎる画素から濃度量子の数が最も少なすぎる画素に濃度量子を移動させることにより、濃度量子を再配置する。

【0026】

50

繰り返し制御部 38 は、再構成像の解像度を段階的に高くしながら、算出部 32、生成部 34、及び再配置部 36 による処理が繰り返されるように制御する。これにより、試料 S の再構成像、すなわち三次元画像が生成される。

【0027】

制御部 22 は、ハードウェア構成としては、図示しない CPU、ROM、及び RAM 等を含んで構成される。CPU は、後述する画像処理を CPU に実行させるための画像処理プログラムが記憶された記憶部 28 から当該画像処理プログラムを読み出して実行する。

【0028】

操作部 24 は、各種操作を行うためのマウス、キーボード等を含んで構成される。

【0029】

表示部 26 は、例えば液晶ディスプレイ等で構成される。

【0030】

記憶部 28 は、画像処理プログラム及び画像処理プログラムを実行することにより得られた三次元画像のデータ等を記憶する。

【0031】

以下、制御部 22 で実行される画像処理について図 2 に示すフローチャートを参照して説明する。なお、図 2 に示す画像処理は、例えば、ユーザーの操作により画像処理プログラムの実行が指示された場合に、記憶部 28 から画像処理プログラムが読み込まれることにより実行される。

【0032】

ステップ S100 では、試料 S に対して複数の照射角度で電子線 E を照射することにより得られた複数の投影像を取得する。具体的には、予め定めた傾斜角度範囲で予め定めた単位角度ずつ試料 S が傾斜されると共に、各傾斜角度において電子銃 18 から電子線 E が試料 S に対して放出されるように、駆動部 14 及び電子銃 18 を制御する。

【0033】

例えば傾斜角度範囲を -70 度 ~ 70 度、単位角度を 10 度とすると、 -70 度、 -60 度、 \dots 、 -10 度、 0 度、 10 度、 \dots 、 60 度、 70 度の傾斜角度 i (i は $1 \sim 15$) で撮影された 15 個の投影像が得られる。

【0034】

そして、各傾斜角度において画像検出器 20 により検出された投影像を取得し、記憶部 28 に記憶する。

【0035】

ステップ S102 では、ステップ S100 で取得した複数の投影像の少なくとも 1 つの投影像に基づいて、濃度量子 (クオンタムユニット: QU) の総数 N を算出する。ここで、濃度量子とは、上記特許文献 1 及び非特許文献 1 に記載されたものと同様の概念であり、試料 S の三次元画像の各画素の濃度値を量子化した場合の単位量子をいう。従って、各画素の濃度値は、濃度量子の積算値で表される。すなわち、1 つの濃度量子は濃度値「1」に相当し、例えば、濃度値が「50」の場合、濃度量子の数が 50 であることを表す。

【0036】

本実施形態では、一例として傾斜角度が 0 度の投影像の各画素の濃度値を積算した値を濃度量子の総数 N とする。なお、複数の投影像の全ての濃度量子の総数を算出し、算出した複数の濃度量子の総数の平均値を総数 N としてもよい。

【0037】

ステップ S104 では、解像度 r を設定する。ここで、解像度 r とは、予め定めたサイズの画像に含まれる画素数をいう。本実施形態では、ステップ S100 で取得した投影像の解像度が一例として 512×512 画素であるものとする。そして、本実施形態では、解像度 r を段階的に高くする。このため、最初の解像度 r は、一例として 32×32 画素に設定する。そして、 64×64 画素、 128×128 画素、 512×512 画素のように解像度を段階的に高くする。なお、解像度 r が段階的に高くなるに従って、濃度量子のサイズは段階的に小さくなる。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 8 】

ステップ S 1 0 5 では、ステップ S 1 0 4 で設定した解像度 r が最低解像度か否かを判定する。本実施形態では、一例としてステップ S 1 0 4 で設定した解像度 r が 32×32 画素であるか否かを判定する。そして、ステップ S 1 0 4 でした解像度 r が最低解像度である場合はステップ S 1 0 6 へ移行する。一方、ステップ S 1 0 4 でした解像度 r が最低解像度でない場合、すなわちステップ S 1 0 4 で設定した解像度 r が最低解像度より高い解像度である場合はステップ S 1 0 7 へ移行する。

【 0 0 3 9 】

ステップ S 1 0 6 では、ステップ S 1 0 4 で設定した解像度 r 、具体的には最低解像度の三次元の再構成像を初期化する。すなわち、再構成像を構成する全ての画素の濃度値を「0」に設定する。

10

【 0 0 4 0 】

ステップ S 1 0 7 では、後述するステップ S 1 0 8 で算出する誤差分布の算出に必要な再構成像として、前解像度で算出した再構成像を設定する。具体的には、後述するステップ S 1 1 8 を前回実行したときの再構成像、すなわち前回の解像度で算出した再構成像を設定する。より具体的には、前回の解像度で算出した再構成像を、ステップ S 1 0 4 で設定した解像度 r に解像度変換した再構成像を設定する。

【 0 0 4 1 】

ステップ S 1 0 8 では、傾斜角度 θ_i の投影像に対応する誤差分布 $E_{map}(x, z)$ を上記非特許文献 1 と同様の手法を用いて下記式を用いて算出する。なお、インデックス i は、全ての傾斜角度 θ_i に対して付される。そして、全ての傾斜角度 θ_i に対して算出された誤差分布の総和が E_{map} である。

20

【 0 0 4 2 】

誤差分布 $E_{map}(x, z)$ は、断層面 ($X - Z$ 平面) の或る座標 (x, z) に濃度量子を配置する必要があるか否かの度合いを数値化したものであり、値が負であれば、その座標の画素に濃度量子が不足していることを表し、値が正であれば、その座標の画素に濃度量子が多すぎることを表す。

【 0 0 4 3 】

$$E_{map}(x, z) = \sum_i BP[E_{\theta_i}(x')]$$

$$E_{\theta_i}(x') = p_{\theta_i, model}(x') - p_{\theta_i, exp.}(x')$$

$$p_{\theta_i, model}(x') = FP[g(x, z)]$$

・・・(1)

【 0 0 4 4 】

ここで、 $g(x, z)$ は、再構成像を表し、 $FP[g(x, z)]$ は再構成像 $g(x, z)$ の投影像を表す。また、 $p_{\theta_i, exp.}(x')$ は、傾斜角度 θ_i の投影像であるが、再構成像 $g(x, z)$ の解像度 r に合わせて解像度変換を行った投影像である。また、 $BP[E_{\theta_i}(x')]$ は、 $E_{\theta_i}(x')$ の逆投影像を表す。

50

【 0 0 4 5 】

すなわち、再構成像 $g(x, z)$ を傾斜角度 θ_i で投影した投影像と、実際に試料 S を傾斜角度 θ_i で投影した投影像との差を逆投影する演算を、各傾斜角度 θ_i について行うことにより、 Y 軸に沿った複数の断層像の誤差分布 $E_{map}(x, z)$ の集合である三次元の誤差分布 $E_{map}(x, y, z)$ が得られる。

【 0 0 4 6 】

ステップ $S110$ では、解像度 r の再構成像を投影した投影像に基づいて濃度量子の総数 N_r を算出する。例えばステップ $S102$ と同様に、再構成像を傾斜角度 0 度で投影した投影像の各画素の濃度値を積算した値を濃度量子の総数 N_r とする。なお、再構成像を全ての傾斜角度で投影した複数の投影像の全ての濃度量子の総数を算出し、算出した複数の濃度量子の総数の平均値を総数 N_r としてもよい。

10

【 0 0 4 7 】

ステップ $S112$ では、ステップ $S108$ で算出した誤差分布 $E_{map}(x, y, z)$ と、ステップ $S110$ で算出した解像度 r の再構成像の濃度量子の総数 N_r と、に基づいて、濃度量子を再構成像の各画素に配置する。具体的には、非特許文献 1 記載の方法と同様に、誤差分布 $E_{map}(x, y, z)$ に従って、総数 N_r の濃度量子を誤差が最も大きい画素から順に配置していく。

【 0 0 4 8 】

ステップ $S114$ では、濃度量子の再配置処理を行う。具体的には、濃度量子が配置され解像度 r の再構成像を構成する画素のうち、座標 (x, y) の Z 軸方向に沿った画素列の各画素について、誤差分布の同じ座標の誤差と比較し、濃度量子の数が最も多すぎる画素と、濃度量子の数が最も少なすぎる画素と、をペアの画素として設定する。すなわち、画素の濃度値と誤差（濃度量子の数）との差が正で最も大きい第 1 の画素と、前記差が負で最も小さい第 2 の画素と、をペアの画素として設定する。そして、第 1 の画素から第 2 の画素へ濃度量子を予め定めた数（例えば 1 個）だけ仮移動させる。図 3 には、ペアの画素の設定の一例を示した。図 3 に示すように、或る座標 (x, y) の矢印 A 方向、すなわち Z 軸方向に沿った画素列のうち、濃度量子の数が最も多すぎる第 1 の画素 $P1$ 及び濃度量子の数が最も少なすぎる第 2 の画素 $P2$ がペアの画素として設定される。

20

【 0 0 4 9 】

次に、濃度量子を仮移動させた再構成像について、上記 (1) 式により誤差分布を再計算する。そして、濃度量子を移動させる前の誤差分布から算出した誤差の総数と、濃度量子を移動させた後の誤差分布から算出した誤差の総数と、を比較し、誤差が減少したか否かを判定する。そして、誤差が減少した場合は、誤差の減少数及びペアの画素の座標を記憶部 28 に記憶する。

30

【 0 0 5 0 】

このように誤差の減少数を判定する処理を、座標 (x, y) の全ての組み合わせにおける Z 軸方向の画素列の各々について行う。そして、最も誤差の減少数が大きいペアの画素について濃度量子を移動させる、すなわち濃度量子を再配置することにより、再構成像を更新する。

【 0 0 5 1 】

そして、上記の処理、すなわち、ペアの画素の設定、濃度量子の仮移動、誤差の減少数の判定、及び濃度量子の再配置の各処理を、誤差の総数が減少しなくなるまで実行する。すなわち、誤差の総数が減少から増加に転じるまで行い、増加する直前の再構成像を本ステップにおける最終的な再構成像とする。

40

【 0 0 5 2 】

ステップ $S116$ では、全ての傾斜角度 θ_i についてステップ $S105 \sim S114$ の処理を実行したか否かを判定し、肯定された場合はステップ $S118$ へ移行する。一方、否定された場合はステップ $S105$ へ移行し、未処理の傾斜角度 θ_i についてステップ $S105 \sim S114$ の処理を実行する。

【 0 0 5 3 】

50

ステップ S 1 1 8 では、全ての傾斜角度 θ_i について算出された再構成像を平均化する処理を行い、最終的な再構成像とする。すなわち、全ての傾斜角度 θ_i について算出された再構成像の同じ座標の画素の平均値を各々算出することにより、最終的な再構成像を算出する。

【 0 0 5 4 】

ステップ S 1 2 0 では、最大解像度、すなわち 512×512 画素までステップ S 1 0 4 ~ S 1 1 8 の処理を実行したか否かを判定し、肯定された場合は本ルーチンを終了する。一方、否定された場合は、ステップ S 1 0 4 へ移行し、解像度 r を一段階高くして、ステップ S 1 0 4 ~ S 1 1 8 の処理を実行する。

【 0 0 5 5 】

図 4 には、段階的に解像度を高くして再構成像を生成した例を示した。画像 G 1 は、濃度変化がある試料 S の計算モデルを表しており、解像度は 512×512 画素である。また、画像 G 2 は、解像度が 32×32 画素の再構成像であり、画像 G 3 は、解像度が 64×64 画素の再構成像であり、画像 G 4 は、解像度が 128×128 画素の再構成像であり、画像 G 5 は、解像度が 512×512 画素の再構成像である。なお、階調数は何れも 256 階調である。図 4 に示すように、解像度が高くなるに従って、計算モデルに近づいていくのが分かる。

【 0 0 5 6 】

このように、本実施形態では、単に濃度量子を配置することにより試料 S の三次元画像を再構成するのではなく、その後誤差分布に基づいて濃度量子の再配置処理を行う。これにより、単に濃度量子を配置することにより試料 S の三次元画像を再構成する場合と比較して、精度良く三次元画像を再構成することができる。

【 0 0 5 7 】

なお、本実施形態では、試料 S を回転させて撮影する場合について説明したが、電子線 E の照射方向を複数の角度に変えて撮影するようにしてもよい。

【 0 0 5 8 】

また、本実施形態では、試料 S に電子線 E を照射する電子線 CT (Computed Tomography) に本発明を適用した場合について説明したが、これに限られるものではない。電子線 CT に限らず、例えば医療用又は工業用の X 線 CT、放射光 CT、超音響 CT、及び MRI (Magnetic Resonance Image) 等、試料 S の投影像を取得して断層像を得ることができる装置であれば本発明を適用可能である。

【 0 0 5 9 】

また、本実施形態では、粒子放射線の 1 つである電子線 E を試料 S に照射する場合について説明したが、中性子線、重粒子線、アルファ線、及びベータ線等の他の粒子放射線を用いても良く、X 線及びガンマ線等の電磁放射線を用いてもよい。

【 0 0 6 0 】

また、本実施形態では、画像処理プログラムが記憶部 28 に予め記憶 (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。画像処理プログラムは、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、画像処理プログラムは、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。

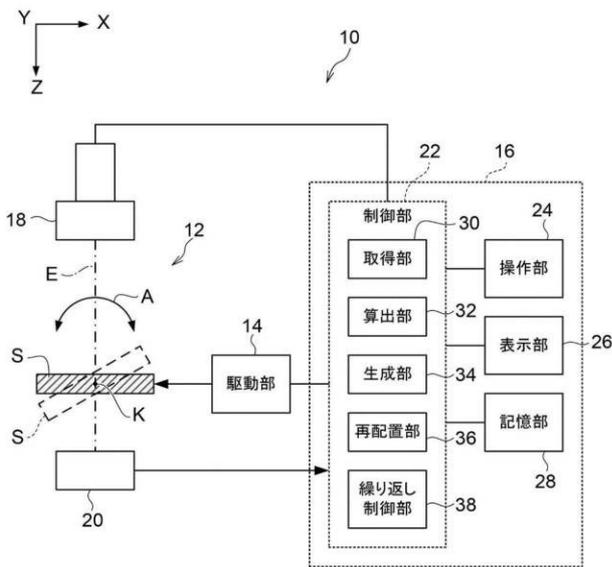
【 符号の説明 】

【 0 0 6 1 】

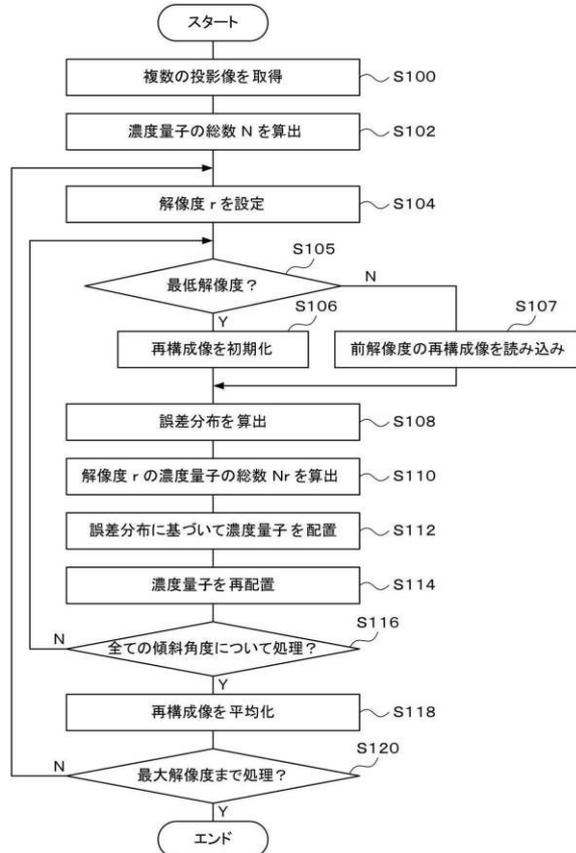
- 1 0 三次元画像再構成システム
- 1 2 透過型電子顕微鏡
- 1 4 駆動部
- 1 6 画像処理装置
- 1 8 電子銃

- 2 0 画像検出器
- 2 2 制御部
- 2 4 操作部
- 2 6 表示部
- 2 8 記憶部
- 3 0 取得部
- 3 2 算出部
- 3 4 生成部
- 3 6 再配置部
- 3 8 繰り返し制御部

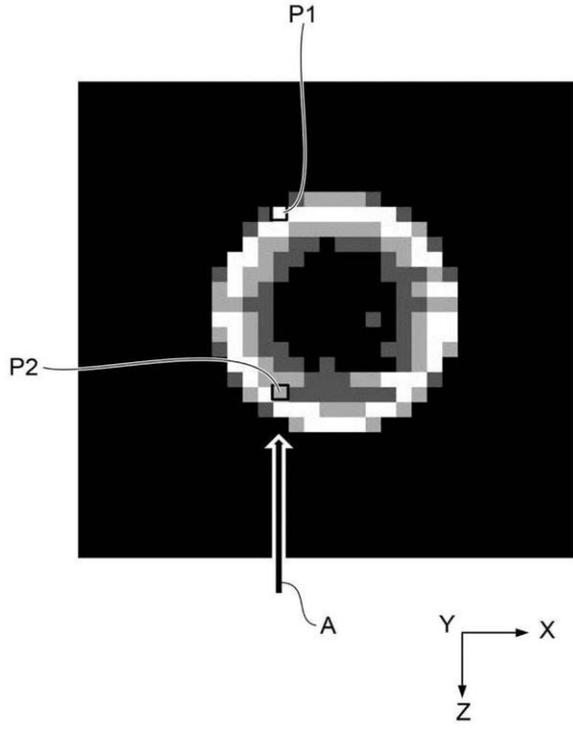
【図1】



【図2】



【 図 3 】



【 図 4 】

