

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5875280号
(P5875280)

(45) 発行日 平成28年3月2日 (2016.3.2)

(24) 登録日 平成28年1月29日 (2016.1.29)

(51) Int.Cl.
GO 1 N 23/20 (2006.01)

F I
GO 1 N 23/20 3 7 0

請求項の数 14 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2011-172973 (P2011-172973)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成23年8月8日 (2011.8.8)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2012-108098 (P2012-108098A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成24年6月7日 (2012.6.7)	(74) 代理人	100126240
審査請求日	平成26年8月8日 (2014.8.8)		弁理士 阿部 琢磨
(31) 優先権主張番号	特願2010-235490 (P2010-235490)	(74) 代理人	100124442
(32) 優先日	平成22年10月20日 (2010.10.20)		弁理士 黒岩 創吾
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(72) 発明者	伊藤 英之助
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤノン株式会社内
		(72) 発明者	長井 健太郎
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤノン株式会社内
		審査官	藤田 都志行
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 トールボット干渉を用いた撮像装置および撮像装置の調整方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電磁波源からの電磁波を回折する回折格子と、
前記回折格子によって回折された前記電磁波の一部を遮る遮蔽格子と、
前記遮蔽格子を経た前記電磁波を検出する検出器と、
前記検出器で検出された電磁波の強度分布に基づいて前記回折格子および遮蔽格子のうち少なくともともいづれか一方の姿勢を調整する調整部と、を有し、
前記調整部は、
前記強度分布に基づいて前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともともいづれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とするトールボット干渉計。

10

【請求項 2】

前記調整部は、
前記強度分布を複数の領域に分割し、
前記複数の領域の前記強度分布に基づいて、前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともともいづれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とするトールボット干渉計。

【請求項 3】

前記調整部は、
前記複数の領域の前記強度分布のそれぞれをフーリエ変換することでキャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報を計算し、

20

前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度分布に基づいて前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とする請求項 2 に記載のトールボット干渉計。

【請求項 4】

前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報が、前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度と、そのスペクトルの周囲のバックグラウンドノイズの強度との比であることを特徴とする請求項 3 に記載のトールボット干渉計。

【請求項 5】

前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報が、前記キャリア周波数に対応したスペクトルのピーク値と、DC 成分に対応するスペクトルのピーク値との比であるビジビリティ値であることを特徴とする請求項 3 に記載のトールボット干渉計。

10

【請求項 6】

前記調整部は、

前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報のばらつきが小さくなるように、前記回折格子と前記遮蔽格子の少なくともいずれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とする請求項 3 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のトールボット干渉計。

【請求項 7】

前記調整部は、

前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報の最小値が前記キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報の最大値に近づくように前記回折格子と前記遮蔽格子の少なくともいずれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とする請求項 3 乃至 6 のいずれか 1 項に記載のトールボット干渉計。

20

【請求項 8】

前記調整部は、

撮像範囲内の異なる領域における前記回折格子と前記遮蔽格子との距離のばらつきが小さくなるように、前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載のトールボット干渉計。

【請求項 9】

前記調整部は、

前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸に対する傾きを調整した後で、前記回折格子と前記遮蔽格子との距離を調整することを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載のトールボット干渉計。

30

【請求項 10】

前記調整部は、

前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸を中心とする回転を調整することを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載のトールボット干渉計。

【請求項 11】

電磁波源からの電磁波を回折する回折格子と、

前記回折格子によって回折された前記電磁波の一部を遮る遮蔽格子と、

前記遮蔽格子を経た前記電磁波を検出する検出器と、

前記検出器で検出された電磁波の強度分布に基づいて、前記光軸に対する前記回折格子の傾きと、前記光軸に対する前記遮蔽格子の傾きとの差の情報を取得する調整部と、を有することを特徴とするトールボット干渉計。

40

【請求項 12】

前記電磁波が X 線であることを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれか 1 項に記載のトールボット干渉計。

【請求項 13】

電磁波源からの電磁波を回折する回折格子と、

50

前記回折格子によって回折された前記電磁波の一部を遮る遮蔽格子と、
前記遮蔽格子を経た前記電磁波を検出する検出器と、を有するトールボット干渉計に用いられ、

前記検出器で検出された電磁波の強度分布に基づいて前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともともいづれか一方の、光軸に対する傾きを調整する調整方法。

【請求項 14】

前記検出器で検出された強度分布を複数の領域に分割する工程と、
前記複数の領域の前記強度分布に基づいて、前記回折格子および前記遮蔽格子のうち少なくともともいづれか一方の、光軸に対する傾きを調整する工程と、
を有することを特徴とする請求項 13 に記載のトールボット干渉計の調整方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、トールボット干渉を用いた撮像装置および撮像装置の調整方法に関する。

【背景技術】

【0002】

トールボット干渉法は光やX線を含む様々な波長の電磁波の干渉を用いて被検体の形状や組成を計測する方法であり、一般に、電磁波源、回折格子、検出器を備える撮像装置が用いられる。トールボット干渉法の原理について簡単に説明する。まず、電磁波源から位相波面の揃った、つまりコヒーレントな入射波を被検体に対し照射する。被検体を透過した電磁波は被検体の形状や組成によって波面が変化する。この波面変化が起きた電磁波が回折格子によって回折されると、回折格子からトールボット距離と呼ばれる特定の距離はなれた位置に干渉パターンが形成される。この干渉パターンを検出器によって検出し、解析することによって被検体によって変化した位相波面（以下、位相像と呼ぶ。）またはその位相波面の微分像（以下、微分位相像と呼ぶ。）を得ることができる。

20

【0003】

また特許文献1に記載されているように、電磁波を透過させる透過部と遮蔽する遮蔽部が周期的に配置された遮蔽格子を、干渉パターンが生じる位置に配置することでモアレを形成し、このモアレを検出し、解析して被検体の位相像や微分位相像を得る方法もある。この方法を用いると、干渉パターンの周期よりも空間分解能が大きい検出器を用いることができるため、電磁波としてX線を用いるトールボット干渉法（以下、X線トールボット干渉法と呼ぶ。）を用いた撮像装置に良く用いられる。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2010-164373号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

遮蔽格子を用いてモアレを形成し、そのモアレの強度分布を検出するトールボット干渉計においては、用いる電磁波の波長や、回折格子や遮蔽格子のピッチによって撮像に適した回折格子や遮蔽格子の姿勢が決まる。回折格子や遮蔽格子の姿勢が撮像に適した姿勢からずれると、得られる被検体の位相像や微分位相像に対するノイズ比が増加するといった画質の低下につながる可能性がある。そこで本発明は、回折格子や遮蔽格子の姿勢を撮像に適した姿勢に調整することによって、より高画質な位相像や微分位相像を得ることができる撮像装置を提供することを目的とする。

40

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記の目的を達成するために、本発明の一側面としてのトールボット干渉計は、電磁波源からの電磁波を回折する回折格子と、回折格子によって回折された電磁波の一部を遮る

50

遮蔽格子と、遮蔽格子を経た電磁波を検出する検出器と、検出器の検出された電磁波の強度分布に基づいて回折格子および遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の姿勢を調整する調整部と、を有し、調整部は、強度分布に基づいて、回折格子および遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸に対する傾きを調整することを特徴とする。

【 0 0 0 7 】

本発明のその他の側面については、以下で説明する実施の形態で明らかにする。

【発明の効果】

【 0 0 0 8 】

本発明によれば、回折格子及び遮蔽格子のうち少なくともいずれか 1 つの姿勢を調整することによって、より高画質な位相像や微分位相像を得ることができる撮像装置を提供することが可能である。

10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 0 9 】

【図 1】本発明の実施形態に係る X 線撮像装置を説明する図である。

【図 2】本発明の実施形態に係る 2 次元回折格子を説明する図である。

【図 3】本発明の実施形態に係る 2 次元遮蔽格子を説明する図である。

【図 4】本発明の実施形態に係る調整部における調整フローを説明する図である。

【図 5】本発明の実施形態に係るモアレの強度分布の領域分割方法を表している図である。

。

【図 6】本発明の実施形態に係る空間周波数スペクトルとキャリア周波数に対応したスペクトルを説明する図である。

20

【図 7】本発明の実施形態に係るキャリア周波数に対応したスペクトル強度分布を説明する図である。

【図 8】回折格子や遮蔽格子の光軸に対する傾きと C N R の変化を説明する図である。

【図 9】本発明の実施形態に係るビジビリティ分布を説明する図である。

【図 10】回折格子や遮蔽格子の光軸に対する傾きとビジビリティ値の変化を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 0 】

以下に、本発明の好ましい実施形態を添付の図面に基づいて詳細に説明する。なお、各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

30

【 0 0 1 1 】

以下に X 線トールボット干渉法を用いた X 線撮像装置を例にとり、実施形態 1 と 2 の説明をする。実施形態 1 と実施形態 2 の撮像装置は、検出器により検出した強度分布（モアレ）を複数の領域に分割し、その領域毎の強度分布に基づいて回折格子又は遮蔽格子の少なくともいずれか一方の姿勢を調整する。より具体的に説明をすると、まず、分割した領域毎にフーリエ変換を行い、キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報を得る。次に、領域毎のキャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報に基づいて回折格子又は遮蔽格子の少なくともいずれか一方の姿勢を調整する。

【 0 0 1 2 】

40

より具体的な実施形態については以下に説明をする。

【 0 0 1 3 】

（実施形態 1）

本実施形態では、分割した複数の領域毎にキャリア周波数に対応したスペクトルのピーク強度とそのスペクトルの周囲のバックグラウンドノイズの強度との比である C a r r i e r t o N o i s e R a t i o（以下、C N R と呼ぶ。）を算出し、算出した C N R の値に基づいて回折格子又は遮蔽格子の少なくともいずれか一方の姿勢を調整する。

【 0 0 1 4 】

本実施形態の構成の一例を図 1 に示す。図 1 に示した X 線撮像装置は X 線源 1 1 0 と、X 線源からの X 線を回折する回折格子 1 3 0 と、回折格子 1 3 0 によって回折された X 線

50

の一部を遮蔽する遮蔽格子 150 と、遮蔽格子を経た X 線を検出する検出器 170 を備えている。更に、回折格子 130 と遮蔽格子 150 の姿勢を調整する調整部 190 も備えている。この撮像装置は、被検体 120 の位相情報をモアレとして撮像する。以下で各構成について説明をする。

【0015】

(X 線源)

本実施形態の撮像装置は電磁波源として X 線源を備えている。X 線源 110 から発生した X 線 111 が被検体 120 を透過すると、被検体 120 の組成や形状に応じて X 線 111 に位相の変化及び吸収が生じる。

【0016】

X 線源としては、連続 X 線を発生させる X 線源を用いても、特性 X 線を発生させる X 線源を用いても良い。また、波長としては、 0.1 以上 5 以下のものから適宜選択される。また、X 線源 110 から出射した X 線の経路上に、波長選択フィルタや X 線を細いビームに分割するための線源用の格子を適宜設けても良い。

【0017】

(回折格子)

回折格子 130 は位相進行部 131 と位相遅延部 132 が周期的に配置された位相格子である。回折格子として、遮蔽部と透過部が周期的に配置された遮蔽格子を用いることもできるが、位相格子を用いた方が X 線量を確保できる点で有利である。回折格子 130 は、X 線 111 を回折することで、明部と暗部を有する干渉パターン 140 を形成する。尚、本明細書では X 線（電磁波）の強度が高いところを明部、低いところを暗部と言う。

【0018】

図 1 では回折格子 130 は、被検体 120 と遮蔽格子 150 の間に配置されているが、X 線源と被検体の間に配置しても良い。回折格子 130 を被検体 120 と遮蔽格子 150 の間に配置すると、被検体により位相波面が変化した X 線が回折されることで被検体の位相情報を持った干渉パターンが形成される。一方、X 線源と被検体の間に回折格子を配置すると、回折格子によって回折された X 線の位相波面が被検体により変化することで被検体の位相情報を持った干渉パターンが形成される。

【0019】

位相進行部 131 と位相遅延部 132 は、透過した X 線に対して位相差がつくように形成されていれば良い。一般的には、位相遅延部 132 を透過した X 線と、位相進行部 131 を透過した X 線の位相差が π 、または $\pi/2$ である。前者を π 回折格子、後者を $\pi/2$ 回折格子と称する場合もある。但し、位相遅延部 132 を透過した X 線と、位相進行部 131 を透過した X 線の位相差は、 π や $\pi/2$ でなくても、X 線を回折する領域内で一定であれば良く、例えば透過した X 線の位相差が $\pi/3$ でも良い。

【0020】

位相進行部 131 と位相遅延部 132 は 1 次元周期を持つように配置されていても良いし、2 次元周期を持つように配置されていても良い。位相進行部 131 と位相遅延部 132 が 2 次元周期を持つように配置されている回折格子の例として、図 2 (A) に示すように位相進行部 131 a と位相遅延部 132 a が市松格子状に配置されている回折格子が挙げられる。他にも、図 2 (B) に示すような位相進行部 131 b と位相遅延部 132 b が井桁格子状に配置されているものも挙げられる。しかし、位相進行部 131 と位相遅延部 132 の配置方法や形状はこれらに限定されるものではなく、例えば位相進行部や位相遅延部の外縁が円形状であっても回折格子として利用することが可能である。

【0021】

回折格子 130 が 1 次元の周期を有する場合には、被検体 120 の 1 次元方向の位相情報しか取得できない。しかし、回折格子 130 が 2 次元の周期を有する場合には、2 次元方向の位相情報取得することができ、より正確に被検体の位相情報を得ることができる。

【0022】

なお、回折格子 1 3 0 を構成する材料は X 線を透過する物質であることが好ましく、例えば、シリコン等を用いることができる。

【 0 0 2 3 】

X 線が回折格子 1 3 0 に回折されることで形成される干渉パターンは、X 線源 1 1 0 と回折格子 1 3 0 との距離を Z_0 とすると、回折格子 1 3 0 からの距離 Z_1 が下記の式 (1) を満たしている位置に最も明瞭に現れる。

【 0 0 2 4 】

式 (1) において、 λ は X 線の波長、 d は回折格子 1 3 0 の格子周期である。

【 0 0 2 5 】

【 数 1 】

$$\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{N} \frac{\lambda}{d^2} \cdots (1)$$

【 0 0 2 6 】

N は回折格子の形態により異なる値であり、以下のように表現できる実数である。なお、 n は自然数である。

1 次元配列の 回折格子 : $N = n / 4 - 1 / 8$

1 次元配列の / 2 回折格子 : $N = n - 1 / 2$

2 次元配列の市松模様 回折格子 : $N = n / 4 - 1 / 8$

2 次元で市松模様 / 2 回折格子 : $N = n / 2 - 1 / 4$

【 0 0 2 7 】

(遮蔽格子)

遮蔽格子 1 5 0 は、周期的に配置された透過部 1 5 1 と遮蔽部 1 5 2 を有し、

干渉パターン 1 4 0 の明部を形成する X 線の一部を遮蔽することでモアレを形成する。そのため、回折格子 1 3 0 から距離 Z_1 だけ離れた位置に設けられることが好ましいが、製造誤差程度であれば遮蔽格子の配置位置がずれていてもモアレを形成することができる。(図 1 では説明の都合上、干渉パターン 1 4 0 と遮蔽格子 1 5 0 を離して記載している。)

なお、遮蔽部 1 5 2 と透過部 1 5 1 は干渉パターン 1 4 0 が形成される位置に遮蔽格子が配置された時にモアレが生じる程度に X 線を遮蔽または透過すれば良く、X 線を完全に遮蔽または透過しなくても良い。透過部 1 5 1 は貫通孔でも良いが、例えばシリコンのような X 線を透過する物質で構成されていても良い。一方、遮蔽部 1 5 2 を構成する材料として、例えば、金を用いることができる。

【 0 0 2 8 】

遮蔽格子 1 5 0 の周期は、干渉パターンと同一、または僅かに異なる。干渉パターンと同一の周期を持つ遮蔽格子を用いた場合、干渉パターンに対して遮蔽格子を面内回転させることによってモアレが発生する。干渉パターンの周期を D 、干渉パターンの明暗の周期方向と遮蔽格子の周期方向のなす角を θ (ただし、 $\theta < 1$ ラジアン) とすれば、モアレの周期 D_m は、 $D / \sin \theta$ となる。

【 0 0 2 9 】

一方、干渉パターンと僅かに異なる周期を持つ遮蔽格子を用いた場合、遮蔽格子の面内回転を行なうことなくモアレが発生する。遮蔽格子の周期を $D_a = D + \Delta D$ (ただし $\Delta D < D$) とすれば、モアレの周期 D_m は、 $D^2 / \Delta D$ となる。

【 0 0 3 0 】

遮蔽格子 1 5 0 において、透過部 1 5 1 と遮蔽部 1 5 2 は、1 次元周期的に配列されていてもよいし、また 2 次元周期的に配列されていてもよい。

【 0 0 3 1 】

例えば、図 2 (A) に示した市松格子状の回折格子であって、回折格子を用いた場合

10

20

30

40

50

には、図3(A)のように透過部151aと遮蔽部152aが2次的に配列されている井桁格子状の遮蔽格子150aを用いることができる。また、図2(A)に示した市松格子状の / 2 回折格子を用いた場合には、図3(B)のように透過部151bと遮蔽部152bが2次的に配列されている市松格子状の遮蔽格子150bを用いることができる。

なお、上記の組合せは一例であり、回折格子と遮蔽格子は種々の組合せが可能である。

【0032】

(検出器)

前記遮蔽格子150を透過したX線の干渉パターンの情報はモアレの強度分布として、X線検出器170によって検出される。X線検出器170は、X線のモアレを撮像することのできる撮像素子である。検出器として、例えば、デジタル信号への変換が可能なFPD(Flat Panel Detector)等を用いることができる。

【0033】

(調整部)

調整部190は、検出器により検出されたモアレの強度分布を複数の領域に分割し、各々の領域毎にキャリア周波数に対応したスペクトル強度情報を算出し、その強度情報の分布に基づいて回折格子と遮蔽格子の姿勢を調整する。但し、本明細書におけるキャリア周波数とは、モアレの基本周期成分の周波数のことを指す。

【0034】

調整部が行う回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整方法について、図4に従って説明する。

【0035】

ステップS410では、モアレを撮像することによってモアレの強度分布が検出器上の画素毎の強度データとして取得される。

【0036】

次に、ステップS420で領域分割数を決定する。領域分割数は、格子の調整精度や、キャリア周波数に対応したスペクトル強度情報の分布状況などによって決定される。但し、キャリア周波数に対応したスペクトル強度情報の分布状況を考慮せずに、格子の調整精度などから予め領域分割数を決定しておき、姿勢調整時には常に決められた数の領域分割数を採っても良い。その場合、ステップS420は不要である。

【0037】

ステップS421では、ステップS420で決定された領域分割数に応じて図5のように領域を分割する。図5(A)では線で囲まれた正方形の1つ1つが検出器の画素を、太線で囲まれた正方形の1つ1つが分割された領域を示しており、モアレの撮像範囲の全領域501a内で、分割された領域510a同士がたがいに接している。この場合、各々の領域の一边は、検出器の画素ピッチをq、縦方向および横方向の画素数をn、縦方向及び横方向の分割数をmとすると、 nq/m で表される。ここでm、およびnは整数である。分割方法はこの限りではなく、例えば、図5(B)に示したように、モアレの撮像範囲の全領域501b内で、分割された領域510bが互いに接していなくても良い。尚、図5(B)のように撮像範囲を分割すると、どの領域にも含まれない画素が存在する。

【0038】

次に、ステップS430とS431によって、ステップS421で分割された領域毎にキャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報を取得する。

【0039】

ステップS430では、分割された領域毎にフーリエ変換を行う。

【0040】

干渉パターンが形成される際には多数の回折光が重なって干渉するため、キャリア周波数と数多くのその高調波成分を含んでいる。しかし、モアレは干渉パターンのキャリア周波数成分を空間的に拡大した形状を持つので、x軸を周期方向とする1次元の回折格子を使用した場合にモアレは(2)式で表すことができる。

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) \dots (2)$$

10

20

30

40

50

)

ここで、 $a(x, y)$ はバックグラウンドを表し、 $b(x, y)$ はモアレのキャリア周波数成分の振幅を表す。また、 f_0 はモアレのキャリア周波数を表し、 $\phi(x, y)$ はキャリア周波数成分の位相を表している。(2)式は、モアレが、バックグラウンドの第1項と、周期性を持った第2項との和で表されることを示している。

【0041】

また、2次元の回折格子を使用した場合のモアレは、(2)式に y 方向のキャリア周波数成分が重畳した形状となる。

【0042】

回折格子130として市松状の $\sqrt{2}$ 回折格子を用いた場合、キャリア周波数成分は、0次回折光と+1次回折光の干渉、および0次回折光と-1次回折光の干渉によって生じる。また、回折格子130として市松状の $\sqrt{2}$ 回折格子を用いた場合は+1次回折光と-1次回折光の干渉によってキャリア周波数成分が生じる。

【0043】

0次回折光と1次回折光は回折格子130で互いに Nd だけ離れた位置にある光線が重なり、+1次回折光と-1次回折光は回折格子130で互いに $2Nd$ だけ離れた位置にある光線が重なる。すなわち、これらの干渉は $\sqrt{2}$ 回折格子の場合はシア量 s が Nd 、回折格子の場合はシア量 s が $2Nd$ のシアリング干渉である。

【0044】

ところで、(2)式は

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2i f_0 x) \dots (3)$$

と書き表すことができる。ここで

$$c(x, y) = 1/2 b(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \dots (4) \text{である。}$$

【0045】

したがって、干渉縞から $c(x, y)$ の成分または $c^*(x, y)$ の成分を取り出すことにより、位相 $\phi(x, y)$ の情報を得ることも可能である。

【0046】

ここで、フーリエ変換によって(4)式は

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_0, f_y) + C^*(f_x + f_0, f_y) \dots (5) \text{となる。}$$

【0047】

ここで $G(f_x, f_y)$ 、 $A(f_x, f_y)$ 、 $C(f_x, f_y)$ はそれぞれ $g(x, y)$ 、 $a(x, y)$ 、 $c(x, y)$ に対する2次元のフーリエ変換である。

【0048】

図6は、1次元周期を持つ格子を使用した場合に検出したモアレの強度分布をフーリエ変換して得られる空間周波数スペクトルである。通常、図6のように3つのスペクトルが生じる。中央のスペクトルは主として $A(f_x, f_y)$ に由来するスペクトルである。一方、その両脇のスペクトルはそれぞれ $C(f_x, f_y)$ と $C^*(f_x, f_y)$ に由来するキャリア周波数に対応するスペクトルであり、これらのスペクトルのピークは $\pm f_0$ の位置に生じる。

【0049】

ステップS431でキャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報を得る。本実施形態では、キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報として、CNRを用いる。CNRは、キャリア周波数に対応したスペクトルのピーク強度とそのスペクトルの周囲のバックグラウンドノイズの強度との比である。CNRの計算には、ステップS420で分割した各々の領域の、キャリア周波数に対応するスペクトルのピーク強度とバックグラウンドノイズの強度を用いる。本実施形態では、キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報として、CNRを用いて回折格子又は遮蔽格子の姿勢を調整するが、他の値を用いて回折格子又は遮蔽格子の調整を行っても良い。キャリア周波数に対応するスペクトルの強度

10

20

30

40

50

情報として、例えば、スペクトルのピーク強度又はスペクトルの積分強度を用いて良い。スペクトルのピーク強度は、 $C(f_x, f_y)$ または $C^*(f_x, f_y)$ の絶対値 $|C(f_x, f_y)|$ 、および $|C^*(f_x, f_y)|$ であり、スペクトルの積分強度は、積分値 $C(f_x, f_y) dx dy$ 、および $C^*(f_x, f_y) dx dy$ である。また、キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報とは、キャリア周波数に対応するスペクトル ($C(f_x, f_y)$ または $C^*(f_x, f_y)$) の強度に関する情報のことであり、ビジビリティも含む。ビジビリティについては実施形態2で説明をする。

【0050】

キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報としてCNRを用いると、CNRに基づいて回折格子や遮蔽格子の姿勢を調整することになる。すると、分割した各々の領域におけるバックグラウンドノイズの強度に領域間で差があっても、撮像範囲全体でCNRを一定の範囲内にすることができる。すると結果として、得られる被検体の位相像あるいは微分位相像の画質の不均一さを軽減することができる。つまり、位相像あるいは微分位相像が、特定の領域だけノイズが高いといったことを防ぐことができる。バックグラウンドノイズの強度が領域間で異なる原因として、例えば製造誤差により回折格子又は遮蔽格子の周期が特定の領域で異なることが挙げられる。

10

【0051】

次のステップS440では、ステップS430で得たキャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報からスペクトルの強度分布を得る。このスペクトル強度分布は、ステップS421で分割された領域を1単位として作成する。つまり、本実施形態ではステップS431で算出したCNRからCNRの分布を得る。図7は、スペクトル強度分布の一例であり、ステップS431で領域毎に算出したCNRの値を2次元マッピングしたものである。但し、ステップS440で得るスペクトルの強度分布は実際には図7の様なマップでなくても良い。複数の領域についてキャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報（本実施形態ではCNR）が分かる情報のことを本明細書ではスペクトルの強度分布と呼ぶ。

20

【0052】

ステップS441では、ステップS440で得られたスペクトル強度分布を検出器画素の縦横方向に対して解析し、スペクトル強度分布のばらつきを標準偏差により評価する。

【0053】

次にステップS450で、ステップS441で得られた標準偏差がしきい値 θ_0 以上の値であるかを判断する。得られた標準偏差が θ_0 よりも小さければそのまま回折格子と遮蔽格子の姿勢調整を行わず、 θ_0 以上であれば以下に説明する回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整を行う。

30

【0054】

但し、ステップS441とS450では標準偏差によりスペクトル強度分布のばらつきを評価し、回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整を行うか否かを決定しているが、標準偏差以外の値で調整を行うか否かを決定しても本発明の効果をすることができる。例えばスペクトル強度情報の最大値と最小値の差の絶対値で調整を行うか否かを決定しても良い。

【0055】

ステップS460では、スペクトル強度分布においてキャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報の値が小さい領域の値が、最大値の値に近づくように、回折格子および遮蔽格子の姿勢を調整する。

40

【0056】

回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整について説明をする。

【0057】

本実施形態の撮像装置は、回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整により、光軸に対する回折格子と遮蔽格子の傾きと、干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度を調整する。

【0058】

まず、光軸に対する回折格子と遮蔽格子の傾きの調整について説明をする。

【0059】

50

図 8 (A) は X 線トールボット干渉法に用いられる撮像装置の構成例であり、光軸に対して遮蔽格子が傾いており、回折格子と遮蔽格子間の距離（以下、格子間距離と呼ぶ。）が上方で大きく、下方で小さくなっている。但し、本明細書における、光軸に対する傾きとは、光軸に対するチルトであり、回折格子や遮蔽格子が光軸に対して、どの程度傾いているかのアオリ角のことをいう。回折格子と遮蔽格子の中心間の距離は式 (1) の z_1 であり、上方のある一点での格子間距離は $1.05z_1$ 、下方のある一点での格子間距離は $0.95z_1$ である。

【 0 0 6 0 】

図 8 (B) は格子間の距離の変化による C N R の変化を示したグラフである。横軸は式 (1) の z_1 を 1 とした時の格子間距離を示しており、縦軸は C N R の値を示している。このグラフより、格子間距離が理想的な距離 (z_1) から 5 % ずれることによって、C N R が 0 . 3 5 d B 下がることわかる。

10

【 0 0 6 1 】

図 8 (B) のグラフは格子間距離と C N R の関係のみを示しているが、スペクトルのピーク強度やスペクトルの積分強度のような、C N R 以外のキャリア周波数に対応するスペクトル強度も格子間距離によって変化する。

【 0 0 6 2 】

このように、光軸に対する回折格子と遮蔽格子の傾きにより、キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報が変化するため、回折格子と遮蔽格子の光軸に対する傾きを調整する。

20

【 0 0 6 3 】

回折格子と遮蔽格子の光軸に対する傾きの具体的な調整方法の例について説明をする。まず、ステップ S 4 4 0 により取得したスペクトルの強度分布から、最も C N R が大きい領域の C N R 値と、そのほかの領域の C N R 値の差を夫々計算する。その後、図 8 (B) のようなグラフを参照して回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾き調整量を計算し、その計算結果に基づいて回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾きを調整する。再度ステップ S 4 1 0 ~ S 4 5 0 を行い、キャリア周波数に対応したスペクトル強度情報の標準偏差がしきい値 θ 以下であれば光軸に対する回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整を完了する。回折格子と遮蔽格子の両方の傾きを調整しても良い。傾き調整の方向 (X 線源側に傾けるのか、検出器側に傾けるのか。) が分からない場合は、回折格子又は遮蔽格子を任意の方向に傾けてステップ S 4 1 0 ~ S 4 3 1 を行い、キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報の変化によって適切な方向を判断すればよい。また、回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾き調整を一回で行う場合、キャリア周波数に対応したスペクトル強度情報の標準偏差がしきい値 θ 以下であるかの確認 (ステップ S 4 1 0 ~ S 4 5 0) は行わなくてもよい。

30

【 0 0 6 4 】

また、調整方法の別の例として、回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾き調整量を計算せずに回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾き調整量を調整する方法がある。

【 0 0 6 5 】

この方法では、あらかじめ傾き移動量を決めておき、回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾きを所定の移動量だけ移動させてから再度ステップ S 4 1 0 ~ S 4 5 0 を行う。

40

【 0 0 6 6 】

キャリア周波数に対応したスペクトル強度情報の標準偏差がしきい値 θ 以下になるまで、所定の量の傾き移動とステップ S 4 1 0 ~ S 4 6 0 を繰り返すことで、回折格子や遮蔽格子の姿勢を適切な姿勢に近づけることができる。

【 0 0 6 7 】

次に干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度の調整について説明をする。干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度は、前述のようにモアレの周期に影響するが、キャリア周波数に対応したスペクトルの強度情報にも影響を与える。干渉パターンと遮蔽格子のピッチによって最適な面内角度があり、その角度からずれるとキャリア周波数に対応したスペ

50

クトルの強度情報が小さくなる。そのため、回折格子及び遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸を中心とする回転を調整することで干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度の調整を行う。具体的な調整方法は、光軸に対する回折格子と遮蔽格子の傾きの調整方法と同様である。

【 0 0 6 8 】

回折格子または遮蔽格子の光軸を中心とする回転は、キャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報がモアレの撮像範囲内の最大値に近づくように調整することが好ましい。一方、回折格子または遮蔽格子の光軸に対する傾きは、例えば最小値に近づけるように調整しても良い。その場合、回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾きを調整した後で、X線源から回折格子までの距離とX線源から遮蔽格子までの距離の少なくともいずれか一方を調整して回折格子から遮蔽格子までの距離を式(1)の z_1 に近づける。すると、モアレの撮像範囲全体のキャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報を大きくなり、最大値に近づけた時と同等以上のキャリア周波数に対応するスペクトルの強度情報が得られる。

10

【 0 0 6 9 】

回折格子または遮蔽格子の姿勢の調整は、アクチュエーターを用いて自動で行っても良いし、格子の姿勢を調整するボタンを用いるなどして手動で行っても良い。

【 0 0 7 0 】

(実施形態2)

本実施形態では、分割した複数の領域毎にモアレ(干渉縞)のコントラストを表す指標であるビジビリティを算出し、算出したビジビリティの値に基づいて回折格子又は遮蔽格子の少なくともいずれか一方の姿勢を調整する。以下、本実施形態について図4、図6、図9、図10を用いて説明するが、実施形態1と重複する部分は省略する。

20

【 0 0 7 1 】

本実施形態の構成は図1に示した実施形態1の場合と同様であり、調整部による調整方法だけ異なるため、調整部以外の説明は省略する。

【 0 0 7 2 】

本実施形態の調整部も、検出器により撮像されたモアレの強度分布を複数の領域に分割し、各々の領域毎にキャリア周波数に対応したスペクトル強度情報を算出し、その強度情報の分布に基づいて回折格子と遮蔽格子の姿勢を調整する。但し、本実施形態では、ステップS431でCNRではなくビジビリティを算出する。

30

【 0 0 7 3 】

ビジビリティとは上述のようにモアレのコントラストを表す指標である。一次元のモアレのビジビリティ V は、

$$V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \cdots (6)$$

と定義される。但し、 I_{max} はモアレの強度の最大値、 I_{min} はモアレの強度の最小値である。

【 0 0 7 4 】

本実施形態では、2次元格子を用いており、モアレ強度分布も2次元であるため、式(6)に示したビジビリティの定義をそのまま用いることは困難である。そこで、式(6)がサインカーブ状のプロファイルに対しては平均値に対するサイン波の振幅の比率に等しいことに注目し、ビジビリティ V を

40

$$V = PC(f_x, f_y) / PA(f_x, f_y) \cdots (7)$$

と定義する。但し、 $PC(f_x, f_y)$ はキャリア周波数に対応するスペクトル $C(f_x, f_y)$ のピーク値、 $PA(f_x, f_y)$ はDC成分に対応するスペクトル $A(f_x, f_y)$ のピーク値である。ビジビリティの計算には、ステップS420で分割した各々の領域の、キャリア周波数に対応するスペクトルのピーク値とDC成分に対応するスペクトルのピーク値を用いる。ビジビリティを用いると、ビジビリティに基づいて回折格子や遮蔽格子の姿勢を調整することになる。すると、分割した各々の領域におけるバックグラウンドノイズの強度に領域間で差があっても、撮像範囲全体でビジビリティを一定の範囲内に

50

することができる。すると結果として、得られる被検体の位相像あるいは微分位相像の画質の不均一さを軽減することができる。

【 0 0 7 5 】

次に、実施形態 1 で行なったのと同様に、ステップ S 4 4 0 では、ステップ S 4 3 1 で取得したビジビリティの値からビジビリティ分布を得る。このビジビリティ分布は、実施形態 1 と同様に、ステップ S 4 2 1 で分割された領域を 1 単位として作成する。図 9 は、ステップ S 4 4 0 で得られるビジビリティ分布の一例であり、ステップ S 4 3 1 で算出した領域毎のビジビリティの値を 2 次元マッピングしたものである。但し、ステップ S 4 4 0 で得るビジビリティ分布は複数の領域についてビジビリティの数値情報が分かる情報であれば図 9 の様なマップでなくても良い。実施形態 1 で C N R の分布を用いて回折格子又は遮蔽格子の姿勢を調整したように、本実施形態ではこのビジビリティの分布を用いて、回折格子又は遮蔽格子の姿勢を調整する。

【 0 0 7 6 】

ステップ S 4 4 1 では、ステップ S 4 4 0 で得られたビジビリティ分布を検出器画素の縦横方向に対して解析し、ビジビリティ分布のばらつきを標準偏差により評価する。

【 0 0 7 7 】

次にステップ S 4 5 0 で、ステップ S 4 4 1 で得られた標準偏差がしきい値 σ_0 以上の値であるかを判断する。得られた標準偏差が σ_0 よりも小さければそのまま回折格子と遮蔽格子の姿勢調整を行わず、 σ_0 以上であれば以下に説明する回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整を行う。

【 0 0 7 8 】

本実施形態では標準偏差により各領域のビジビリティのばらつきを評価し、回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整を行うか否かを決定しているが、実施形態 1 と同様に標準偏差以外の値で回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整を行うか否かを決定しても良い。例えばビジビリティの最大値と最小値の差の絶対値で調整を行うか否かを決定しても良い。

【 0 0 7 9 】

ステップ S 4 6 0 では、ビジビリティ分布においてビジビリティの値が小さい領域の値が、最大値の値に近づくように、回折格子および遮蔽格子の姿勢を調整する。

【 0 0 8 0 】

回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整方法は実施形態 1 と同様である。

【 0 0 8 1 】

図 1 0 (A) は、図 8 (A) と同様に X 線トールボット干渉法に用いられる撮像装置の構成例であり、格子間距離が上方で大きく、下方で小さくなっている。回折格子と遮蔽格子の中心間の距離は式 (1) の z_1 であり、上方のある一点での格子間距離は $1.05z_1$ 、下方のある一点での格子間距離は $0.95z_1$ である。

【 0 0 8 2 】

図 1 0 (B) は格子間の距離の変化によるビジビリティの変化を示したグラフである。横軸は式 (1) の z_1 を 1 とした時の格子間距離を示しており、縦軸はビジビリティの値を示している。図 1 0 (B) のようなグラフを参照して光軸に対する傾き調整量を計算すると、回折格子あるいは遮蔽格子の光軸に対する姿勢を調整できる。

【 0 0 8 3 】

再度ステップ S 4 1 0 ~ S 4 4 1 を行い、ビジビリティ値の標準偏差がしきい値 σ_0 以下になったとき、アライメント調整を完了する。傾き調整の方向が分からない場合は、回折格子又は遮蔽格子を任意の方向に動かし、その格子の移動によるビジビリティ値の変化によって適切な方向を判断すれば良い。

【 0 0 8 4 】

回折格子と遮蔽格子の姿勢の調整方法の別の例として、回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾き調整量を計算せずに回折格子又は遮蔽格子の光軸に対する傾きを調整する方法がある。この方法では、ビジビリティ値の平均値を計算し、その平均値と離れた値をとる領域における回折格子と遮蔽格子の距離を調整するように回折格子と遮蔽格子の傾きを所

10

20

30

40

50

定の移動量分だけ調整する。ビジビリティ値の標準偏差がしきい値 σ_0 以下になるまでステップ S 4 1 0 ~ S 4 6 0 を繰り返すことで、回折格子や遮蔽格子の姿勢を適切な姿勢に近づけることができる。

【 0 0 8 5 】

干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度の調整も実施形態 1 と同様に行う。

【 0 0 8 6 】

干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度は、ビジビリティ値にも影響を与える。干渉パターンと遮蔽格子のピッチによって最適な面内角度があり、その角度からずれるとビジビリティ値が小さくなる。そのため、回折格子及び遮蔽格子のうち少なくともいずれか一方の、光軸を中心とする回転を調整することで干渉パターンに対する遮蔽格子の面内角度の調整を行う。具体的な調整方法は、光軸に対する回折格子と遮蔽格子の傾きの調整方法と同様である。

10

【 0 0 8 7 】

また、回折格子あるいは遮蔽格子の光軸を中心とする回転は、ビジビリティ値がモアレの撮像範囲内の最大値に近づくように調整することが好ましいが、光軸に対する傾きは、例えば最小値に近づけるように調整しても良い。その場合、光軸に対する傾きを調整した後で X 線源から回折格子までの距離や、X 線源から遮蔽格子までの距離を調整して回折格子から遮蔽格子までの距離を式 (1) の z_1 に近づける。すると、モアレの撮像範囲全体のビジビリティ値が大きくなり、最大値に近づけた時と同等以上のビジビリティ値が得られる。

20

【 0 0 8 8 】

実施形態 1 と 2 では検出器による検出結果であるモアレの強度分布を複数の領域に分割し、各々の領域毎にフーリエ変換を行う。そして、領域毎のフーリエ変換により得られた値を用いてキャリア周波数に対応したスペクトル強度に関する情報を算出し、その算出した値に基づいて回折格子又は遮蔽格子の姿勢を調整する。しかし、回折格子や遮蔽格子の姿勢の調整方法はこれに限定されない。

【 0 0 8 9 】

例えば、縞走査を行うことで分割した領域毎にビジビリティを算出し、これに基づいて回折格子や遮蔽格子の姿勢を調整しても良い。また、モアレの強度分布を複数の領域に分割せずにモアレのボケ具合によって光軸に対する傾きを調整しても良い。

30

【 0 0 9 0 】

また、調整部 1 9 0 は、検出器 1 7 0 で検出されたモアレの強度分布から被検体の微分位相像や位相像を得るための演算も行う。

【 0 0 9 1 】

被検体の微分位相像や位相像を得るために、調整部 1 9 0 はまず、検出器 1 7 0 で検出されたモアレの強度分布をフーリエ変換することで空間周波数スペクトルを算出する。次に、キャリア周波数に対応するスペクトルを用いて位相回復処理を行い、微分位相像や位相像を得る。本実施形態では、調整部 1 9 0 で被検体の微分位相像や位相像を得るための演算を行っているが、別途に演算装置を設け、被検体の微分位相像や位相像を得るための演算を行っても良い。

40

【 0 0 9 2 】

また、調整部 1 9 0 (或いは演算装置) に表示部を接続して X 線撮像システムを構成しても良い。但し、本明細書においては、被検体の位相像や微分位相像を得るための演算を行うことができる X 線撮像装置と、その演算結果に基づいた画像を表示する表示部をまとめて X 線撮像システムと呼ぶ。

【 0 0 9 3 】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種種の変形および変更が可能である。

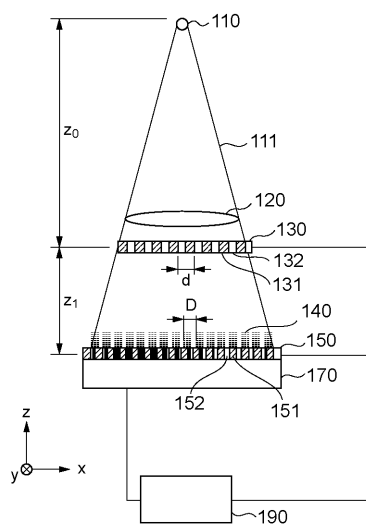
【 符号の説明 】

【 0 0 9 4 】

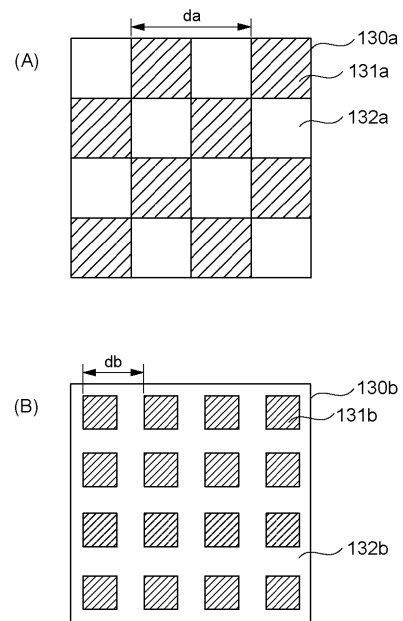
50

- 1 1 0 X線源
 1 3 0 回折格子
 1 5 0 遮蔽格子
 1 7 0 検出器
 1 9 0 調整部

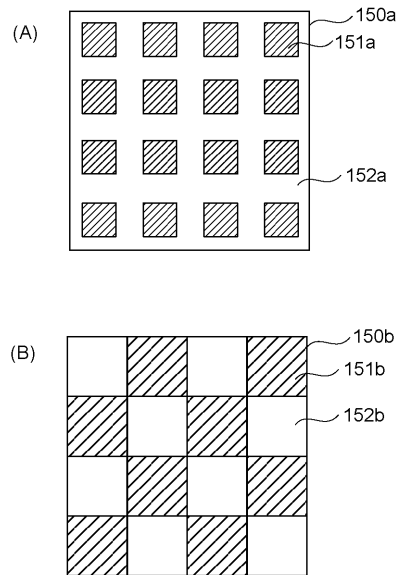
【図1】



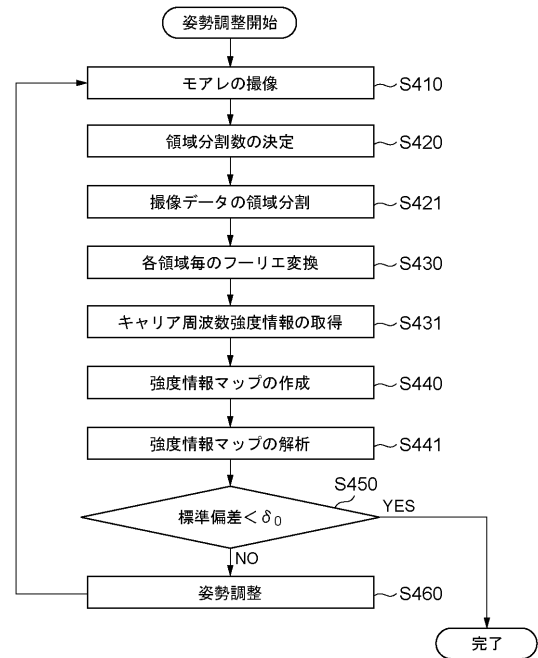
【図2】



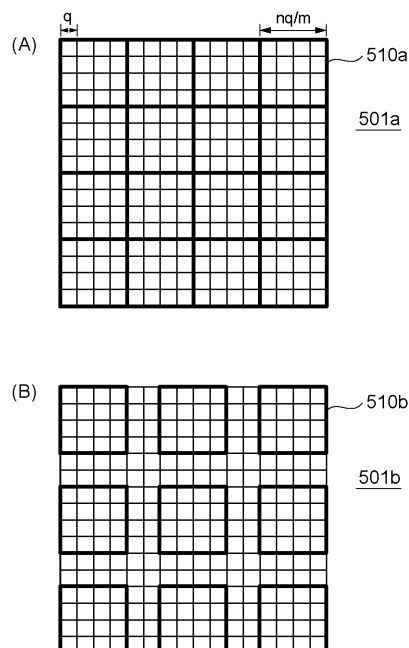
【図 3】



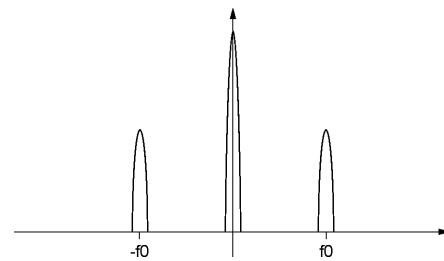
【図 4】



【図 5】

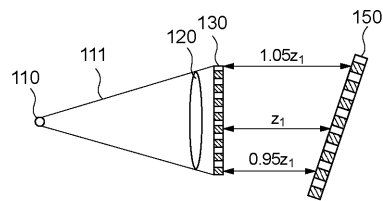


【図 6】

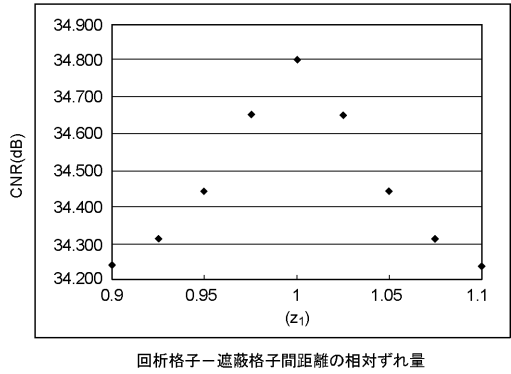


【図 8】

(A)

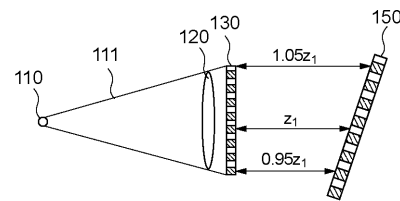


(B)

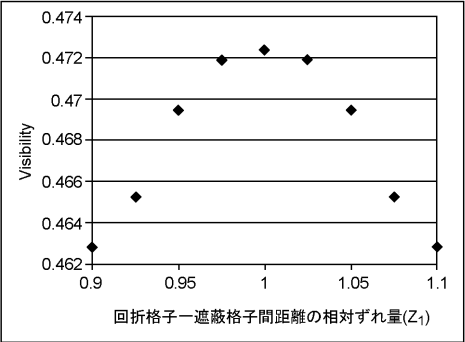


【図 10】

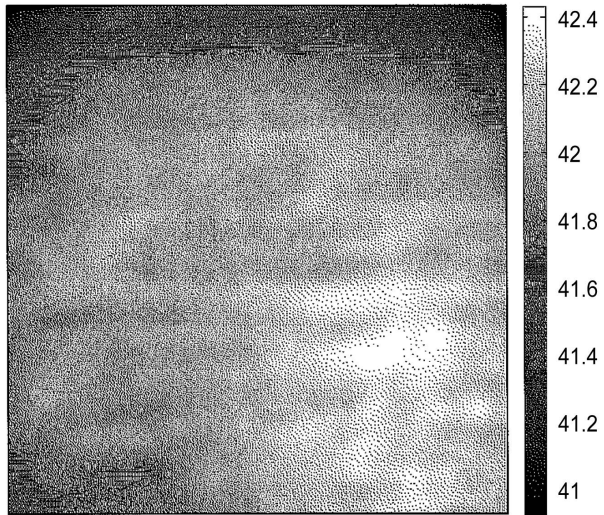
(A)



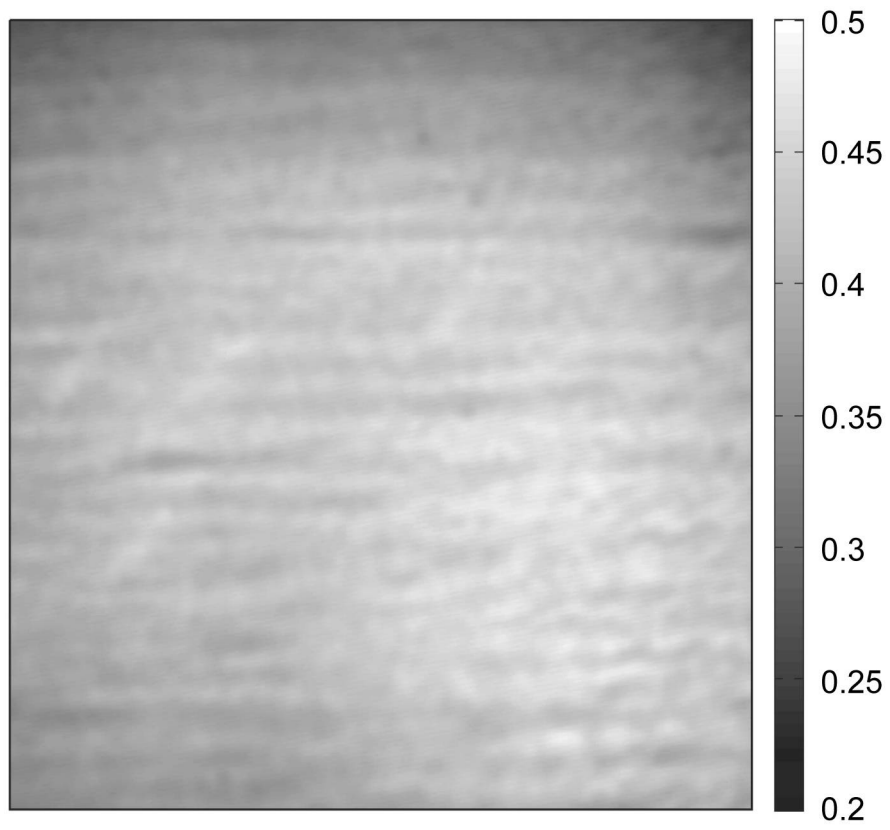
(B)



【図 7】



【図 9】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2010-190777(JP,A)
特開平02-188907(JP,A)
国際公開第2010/050483(WO,A1)
特表2008-545981(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0074395(US,A1)
百生 敦,「医用画像分野におけるX線位相イメージングの期待」,応用物理,社団法人応用物理学会,2007年 4月10日,Vol. 64, No. 4, pages 363-368
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N 23/20
JSTPlus/JST7580(JDreamIII)