

(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
2010年5月6日(06.05.2010)



(10) 国際公開番号
WO 2010/050483 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 23/04 (2006.01) A61B 6/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2009/068434
- (22) 国際出願日: 2009年10月27日(27.10.2009)
- (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 2008-278425 2008年10月29日(29.10.2008) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): キヤノン株式会社 (CANON KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒1468501 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 大内 千種 (OUCHI Chidane) [JP/JP]; 〒1468501 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 Tokyo (JP). 伊藤 英之助 (ITO Hidenosuke) [JP/JP]; 〒1468501 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 Tokyo (JP). 長井

健太郎 (NAGAI Kentaro) [JP/JP]; 〒1468501 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 Tokyo (JP). 田 透 (DEN Toru) [JP/JP]; 〒1468501 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 Tokyo (JP).

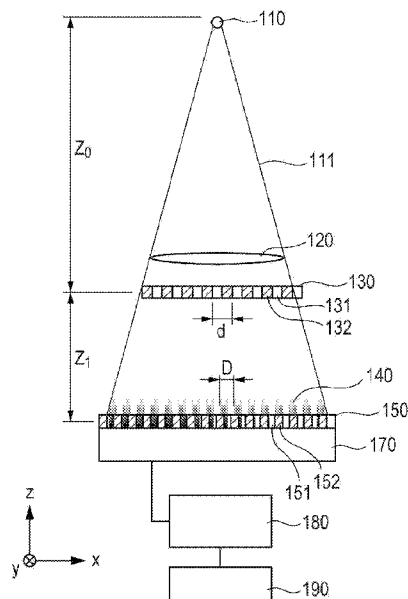
- (74) 代理人: 内尾 裕一 (UCHIO Hirokazu); 〒1468501 東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤノン株式会社内 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ,

[続葉有]

(54) Title: X-RAY IMAGING DEVICE AND X-RAY IMAGING METHOD

(54) 発明の名称: X線撮像装置およびX線撮像方法

[図1]



(57) Abstract: Disclosed are an X-ray imaging device and X-ray imaging method that are able to acquire a differential phase image or phase image of a subject from at least one imaging pass. The X-ray imaging device comprises a phase grating (130), absorption grating (150), detector (170), and arithmetic device (180). The arithmetic device (180) executes a Fourier transform process that acquires a spatial frequency spectrum by Fourier transformation of the intensity distribution of the moiré pattern acquired by the detector. This also executes a phase recovery process that separates the spectrum corresponding to a carrier frequency from the spatial frequency spectrum obtained by the Fourier transform process, and then uses inverse Fourier transform to acquire a differential phase image.

(57) 要約: 少なくとも1回の撮像から、被検体の微分位相像または位相像を取得することができるX線撮像装置およびX線撮像方法を提供する。本発明に係るX線撮像装置は、位相格子130と吸収格子150と検出器170と演算装置180を有する。演算装置180は、検出器で取得したモアレの強度分布をフーリエ変換することにより、空間周波数スペクトルを取得するフーリエ変換工程を実行する。また、フーリエ変換工程により得られた空間周波数スペクトルから、キャリア周波数に対応したスペクトルを分離し、逆フーリエ変換を用いて微分位相像を取得する位相回復工程を実行する。



NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア
(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ
(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL,
NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ,

CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN,
TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： X線撮像装置およびX線撮像方法

技術分野

[0001] 本発明は、X線撮像装置およびX線撮像方法に関する。

背景技術

[0002] X線は高い物質透過性を持ち、かつ高空間分解能イメージングが可能であることから、工業的用途として物体の非破壊検査、医療用途としてレントゲン撮影、等に用いられている。これらは、物体や生体内の構成元素や密度差によりX線透過時の吸収の違いを利用してコントラスト画像を形成するものであり、X線吸収コントラスト法と言われる。しかし、軽元素ではX線吸収が非常に小さいため、生体の構成元素である炭素、水素、酸素などからなる生体軟組織、あるいはソフトマテリアルをX線吸収コントラスト法により画像化することは困難である。

[0003] これに対して、軽元素で構成される組織でも明瞭な画像化を可能とする方法として、X線の位相差を用いたX線位相コントラスト法の研究が、1990年代より行なわれている。

[0004] 数多く開発されたX線位相コントラスト法のなかでも、通常のX線管を用いることが可能な方法として、タルボ干渉を利用したX線位相コントラスト法がある（特許文献1）。

[0005] 特許文献1に記載のタルボ干渉を利用した方式は、X線を発生するX線管、X線の位相を変調し干渉強度分布を発生させるための位相格子、および前記干渉強度分布をモアレの強度分布に変換する吸収格子、前記干渉強度分布を検出するX線検出器から構成される。

[0006] 特許文献1に記載の方式では、吸収格子を格子周期方向に走査することにより撮像を行なう。この走査により、検出されるモアレは移動し、走査量が吸収格子の1周期に達すると、モアレ画像は元の状態へ戻る。前記走査中の少なくとも3枚以上の撮像データを用いて演算処理することにより、微分位

相像を取得する。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：米国特許 7 1 8 0 9 7 9 号明細書

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 上記特許文献 1 に記載の方法は、少なくとも 3 枚以上の撮像を行なうことにより微分位相像を取得し、その微分位相像から位相像を演算する方法である。

[0009] しかしながら、特許文献 1 に記載の方法は 3 枚以上の撮像が必要になることから、撮像中に被検体が移動すると、画質が低下するという問題がある。

[0010] また、撮像時間の長時間化は被検体への X 線線量の増加を招き、医療用の用途を考慮すると好ましくない。

[0011] そこで、本発明は、少なくとも 1 回の撮像から、被検体の微分位相像または位相像を取得することができる X 線撮像装置および X 線撮像方法の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明に係る X 線撮像装置は、X 線源と、前記 X 線源からの X 線を透過させることにより、タルボ効果による干渉強度分布を形成する位相格子と、前記位相格子により形成された干渉強度分布の一部を遮光することによりモアレを生じさせる吸収格子と、前記吸収格子により生じたモアレの強度分布を検出する検出器と、前記検出器により検出されたモアレの強度分布から被検体の情報を画像化し、出力する演算装置を有し、前記演算装置は、前記検出器で取得したモアレの強度分布をフーリエ変換することにより、空間周波数スペクトルを取得するフーリエ変換工程と、前記フーリエ変換工程により得られた空間周波数スペクトルから、キャリア周波数に対応したスペクトルを分離し、逆フーリエ変換を用いて微分位相像を取得する位相回復工程と、を

実行するように構成されていることを特徴とする。

発明の効果

- [0013] 本発明によれば、少なくとも 1 回の撮像から、被検体の微分位相像または位相像を取得することができる X 線撮像装置および X 線撮像方法を提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0014] [図1]本発明の実施形態 1 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 2、および 3 に係る 2 次元位相格子を説明する図である。
[図3]本発明の実施形態 1、および 2 に係る 2 次元吸収格子を説明する図である。
[図4]干渉強度分布のスペクトルパターンを表している図である。
[図5] 2 次元位相格子を用いた場合のモアレの強度分布およびスペクトルパターンを表している図である。
[図6]本発明の演算装置で実施する解析方法のフローチャートを説明する図である。
[図7]本発明の実施形態 2 に係るモアレの強度分布および空間周波数スペクトルを説明する図である。
[図8]本発明の実施形態 3 に係るモアレの強度分布および空間周波数スペクトルを説明する図である。
[図9]本発明の実施形態 4 に係るズーム機構を説明する図である。

発明を実施するための形態

- [0015] (実施形態 1)

タルボ干渉を用いた X 線撮像装置の構成の一例を図 1 に示す。X 線撮像装置を用いて位相像を得るまでの工程を具体的に説明する。

- [0016] (X 線源)

X 線源 110 から発生した X 線 111 が被検体 120 を透過する。X 線 111 は、被検体 120 を透過する際に、被検体 120 の組成や形状等に応じ

た位相の変化及び吸収を生じる。

[0017] X線としては、連続X線を用いても特性X線を用いても良い。また、波長としては、0.1 Åから5 Å程度から適宜選択される。また、X線源110の後に、波長選択フィルタや線源用の格子を適宜設けても良い。

[0018] (位相格子)

前記被検体120を透過したX線111は、位相格子130を透過すると、タルボ効果により干渉強度分布140を形成する。

[0019] 位相格子130は、被検体120よりも上流側または下流側に配置される。

[0020] 位相格子130は、X線透過部材の厚みを周期的に変化させることにより構成された位相進行部分131と位相遅延部132からなる。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よい。たとえば、位相進行部131を透過したX線の位相が位相遅延部132を透過したX線の位相に対して π だけ進行するように構成されている。厚みの変化量は、用いるX線の波長および部材により決定される。

[0021] 位相格子130は、位相遅延部132を透過したX線の位相に対して、位相進行部131を透過したX線の位相が π 、または $\pi/2$ 変調するものが一般的である。前者を π 位相格子、後者を $\pi/2$ 位相格子と称する場合もある。ただし、位相の変調量は周期的であればよく、例えば $\pi/3$ 変調するものであっても良い。

[0022] 位相格子130は、1次元の線状形状でもいいし、図2(A)に示すような2次元の市松模様で構成されていてもよい。また、図2(B)に示すような網戸状の模様で構成されていてもよい。図2において、dは周期であり、201は2次元位相格子、210は位相進行部、220は位相遅延部を表している。

[0023] なお、位相進行部210または位相遅延部220の形状は図2(A)および図2(B)では正方形であるが、作製上、外縁が円形状に変形することも

ある。このように円形状に変形した場合においても、位相格子として利用することが可能である。

[0024] 位相格子 130 が 1 次元の周期を有する場合には、被検体 120 の 1 次元方向の位相勾配情報しか取得できない。しかし、位相格子 130 が 2 次元の周期を有する場合には、2 次元方向の位相勾配情報を取得することができる点で有利である。

[0025] なお、位相格子 130 を構成する材料は X 線を透過する物質が好ましく、例えば、シリコン等を用いることができる。

[0026] 位相格子 130 の透過後に形成された干渉強度分布は、X 線源と位相格子 130 との距離 Z_0 とすると、吸収格子 150 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。ここで「干渉強度分布」とは、前記位相格子 130 の格子周期を反映した周期的強度分布のことである。

[0027] 式 (1) において、 λ は X 線の波長、 d は位相格子 130 の格子周期である。

[0028] [数1]

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

N は位相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 π 位相格子 : $N = n / 4 - 1 / 8$

1 次元配列の $\pi / 2$ 位相格子 : $N = n - 1 / 2$

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

2 次元で市松模様 $\pi / 2$ 位相格子 : $N = n / 2 - 1 / 4$

[0029] (吸収格子)

干渉強度分布の周期は、一般に X 線検出器 170 の画素サイズより小さいため、そのままでは干渉強度分布を検出できない。そこで、吸収格子 150 を用いることによって、X 線検出器 170 の画素サイズより大きな周期のモアレを発生させ、モアレの強度分布を X 線検出器 170 で検出する。吸収格

子 1 5 0 は、位相格子 1 3 0 から距離 Z_1 だけ離れた位置に設けることが好ましい。

[0030] 吸収格子 1 5 0 は、周期的に配列した透過部 1 5 1 と遮光部 1 5 2 を有し、位相格子 1 3 0 で形成された干渉強度分布 1 4 0 の明部の一部を遮光するように配置される。なお、透過部 1 5 1 は X 線の一部が透過可能に構成されていればよく、開口が貫通している必要はない。吸収格子 1 5 0 を構成する材料は X 線をよく吸収する物質であればよく、例えば、金を用いることができる。

[0031] ここで、吸収格子 1 5 0 の周期は、干渉強度分布と同一、または僅かに異なる。

[0032] 干渉強度分布と同一周期を持つ吸収格子を用いた場合、吸収格子の面内回転によってモアレが発生する。干渉強度分布の周期を D 、干渉強度分布の明暗の方位と吸収格子の方位のなす角を θ （ただし、 $\theta \ll 1$ ）とすれば、モアレの周期 D_m は、 D/θ となる。

[0033] 一方、干渉強度分布と僅かに異なる周期を持つ吸収格子を用いた場合、吸収格子の面内回転を行なうことなくモアレが発生する。吸収格子の周期を $D_a = D + \delta$ （ただし $\delta \ll D$ ）とすれば、モアレの周期 D_m は、 D^2/δ となる。

[0034] 吸収格子 1 5 0 において、透過部 1 5 1 は、1 次元的に配列されていてもよいし、また 2 次元的に配列されていてもよい。

[0035] 例えば、図 2（A）に示した市松状の位相格子であって、 π 位相格子を用いた場合には、図 3（A）のように透過部 3 5 1 と遮光部 3 5 2 が 2 次元的に配列されている網戸状の吸収格子 3 0 0 を用いる。また、図 2（A）に示した市松状の $\pi/2$ 位相格子を用いた場合には、図 3（B）のように透過部 3 5 1 と遮光部 3 5 2 が 2 次元的に配列されている市松状の吸収格子 3 0 0 を用いる。

[0036] なお、上記の組合せは一例であり、位相格子と吸収格子は種々の組合せが可能である。

[0037] (検出器)

前記吸収格子 140 を透過した X 線の干渉強度分布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 線の干渉強度分布の情報を検出することのできる素子である。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。

[0038] (演算装置)

前記 X 線検出器 170 で検出されたモアレの強度分布の情報は、後述の解析方法による演算装置 180 によって解析され、微分位相像や位相像を画像化する。取得された微分位相像や位相像は、表示部 190 に表示するための出力画像である。演算装置 180 は例えば CPU (Central Processing Unit) を有する。

[0039] 以下、検出器で取得されるモアレの強度分布情報から位相像を取得する解析方法について説明し、その後に演算装置で行なう処理工程について説明する。

[0040] (解析方法)

干渉強度分布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、基本周波数 (以後キャリア周波数と呼ぶ) と数多くのその高調波成分を含んでいる。しかし、モアレは干渉強度分布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、刻線が x 軸に直交する 1 次元の位相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。

[0041] [数2]

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

[0042] また、2 次元の位相格子を使用した場合には、(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。

[0043] (2) 式は、モアレが、バックグラウンドの第一項と、周期性を持った第二項との和で表されることを示している。ここで、a (x, y) はバックグ

ラウンドを表し、 $b(x, y)$ はキャリア周波数成分の振幅を表す。また、 f_0 は干渉縞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。

[0044] キャリア周波数成分は、位相格子 130 として市松状の $\pi/2$ 位相格子を用いた場合は、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、位相格子 130 として市松状の π 位相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。

[0045] 0 次回折光と 1 次回折光は位相格子 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 次回折光は位相格子 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 $\pi/2$ 位相格子の場合はシア量 s が Nd 、 π 位相格子の場合はシア量 s が $2Nd$ のシアリング干渉である。

[0046] したがって、位相格子 130 の位置における被検体 120 の位相像を $W(x, y)$ とすると、位相 $\phi(x, y)$ と位相像 $W(x, y)$ は次式の関係がある。

[0047] [数3]

$$\phi(x, y) = W(x + s, y) - W(x, y)$$

[0048] 一般に s は微小なので、

[0049] [数4]

$$\phi(x, y) \cong s \frac{\partial}{\partial x} W(x, y) \cdots (3)$$

となる。

[0050] ここで、(3) 式より位相 $\phi(x, y)$ は被検体 120 の位相像 $W(x, y)$ を微分した情報となっていることがわかる。したがって、被検体 120 の位相像 $W(x, y)$ は $\phi(x, y)$ を積分することで求めることができる。

。

[0051] ところで、位相 $\phi(x, y)$ は、(2)式からフーリエ変換法で求めることができる。すなわち、(2)式は

[0052] [数5]

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x) \cdots (4)$$

と書き表すことができる。ここで

[0053] [数6]

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \cdots (5)$$

である。

[0054] 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 $\phi(x, y)$ の情報を得ることが可能となる。

[0055] ここで、フーリエ変換によって(4)式は

[0056] [数7]

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_0, f_y) + C^*(f_x + f_0, f_y) \cdots (6)$$

となる。

[0057] ここで $G(f_x, f_y)$ 、 $A(f_x, f_y)$ 、 $C(f_x, f_y)$ はそれぞれ $g(x, y)$ 、 $a(x, y)$ 、 $c(x, y)$ に対する二次元のフーリエ変換である。

[0058] 図4は、1次元格子を使用した場合の干渉強度分布のスペクトルパターンである。通常、図4のように3つのピークが生じる。中央のピークは主として $A(f_x, f_y)$ に由来するピークである。一方、その両脇のピークはそれぞれ $C(f_x, f_y)$ と $C^*(f_x, f_y)$ に由来するキャリア周波数ピークであり、これらのピークは $\pm f_0$ の位置に生じる。

[0059] 次に、 $C(f_x, f_y)$ あるいは $C^*(f_x, f_y)$ に由来するピークのある領域を切り出す。例えば、 $A(f_x, f_y)$ に由来するピークと、 $C(f_x, f_y)$

）あるいは $C^*(f_x, f_y)$ に由来するピークの周囲を切り出すことにより、 $C(f_x, f_y)$ あるいは $C^*(f_x, f_y)$ に由来するピークを分離する。

[0060] 次に、分離した $C(f_x, f_y)$ あるいは $C^*(f_x, f_y)$ に由来するピークを周波数空間の原点に移動させ、逆フーリエ変換を行なう。そして逆フーリエ変換により得られた複素数情報から位相 $\phi(x, y)$ 、すなわち微分位相情報を得る。

[0061] また、図5(A)は、市松模様の $\pi/2$ 位相格子(図2(A))と、網戸模様の吸収格子(図3(A))、または、市松模様の吸収格子(図3(B))を用いた場合のモアレの強度分布の例であり、510はモアレの明部、520はモアレの暗部である。なお、市松模様の π 位相格子(図2(A))と、市松模様の吸収格子(図3(B))を用いた場合にも、このような斜め方向にモアレの強度分布が生じる。

[0062] また、図5(B)は、市松模様の π 位相格子(図2(A))と、網戸模様の吸収格子(図3(A))を用いた場合のモアレの強度分布であり、530はモアレの明部、540はモアレの暗部である。この場合、縦横方向にモアレの強度分布が生じる。

[0063] なお、網戸模様の位相格子(図2(B))を用いて、上記のようなモアレの強度分布を得ることもできる。

[0064] 図5(C)、(D)はそれぞれ、図5(A)、(B)で示したモアレの強度分布をフーリエ変換の一種であるFFT(Fast Fourier Transform)処理することによって得られた空間周波数スペクトルである。FFTで算出可能な最大空間周波数は、X線検出器170の画素周期を P とすれば $1/(2P)$ である。

[0065] それぞれ、直交する位置にある2つのピーク570と571および580と581の周囲を、上述の1次元の場合と同様に切り出して、それぞれ原点に移動させ逆フーリエ変換を行なう。破線は切り出し領域を示している。そして逆フーリエ変換により得られた複素数情報から、直交する2方向の微分位相情報を得る。

[0066] ここで、図 5 (C) 場合は ± 45 度方向の微分位相情報となり、図 5 (D) 場合はXおよびY方向の微分位相情報となる。

[0067] このようにして得られた微分位相情報は、 2π の領域の間に畳み込まれている(ラップされている)ことが多い。すなわち、ある画面上の任意の点における真の位相を $\phi(x, y)$ とし畳み込まれた位相を $\phi_{wrap}(x, y)$ とすると

[0068] [数8]

$$\phi_{wrap}(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi n(x, y) \cdots (7)$$

の関係となる。ここでnは整数であり、 $\phi_{wrap}(x, y)$ がある 2π の幅を持った領域、例えば0から 2π や $-\pi$ から $+\pi$ の間に入るように決定される。

[0069] これらの情報を元にして、 $\phi(x, y)_{wrap}$ の位相接続(アンラップ)を行ない元の $\phi(x, y)$ に復元する。

[0070] 被検体の位相像 $W(x, y)$ は式(8)により復元した $\phi(x, y)$ を積分して求めることができる。

[0071] [数9]

$$W(x, y) = \frac{1}{s} \int \phi(x, y) dx \cdots (8)$$

[0072] 1次元格子を使用した場合は積分方向が格子刻線方向と直交する方向にしかできない。そのため、位相像 $W(x, y)$ を正しく計測するには、X線検出器170の前記刻線方向と平行な1辺に被検体120を通過しないX線が照射されるようにして位相像 $W(x, y)$ が既知の部分の設定が必要がある。

[0073] 一方、2次元格子を使用した場合は2方向の積分ができるのでX線検出器170全面に被検体120を通過したX線が照射されても正しく位相像 $W(x, y)$ を計測できる。

[0074] (演算装置で行なう処理工程)

上記を踏まえて、前記演算装置 180 において実行する処理フローの一例を図 6 に示す。

- [0075] まず、前記 X 線検出器 170 からモアレの強度分布の情報を取得する (S 610)。
- [0076] 次に、S 610 で得られたモアレの強度分布の情報をフーリエ変換し、空間周波数スペクトルを取得するフーリエ変換工程を行なう (S 620)。
- [0077] 次に、S 620 で得られた周波数空間において、キャリア周波数に対応したスペクトル (位相情報を担っているスペクトル) を切り出すピーク分離工程を行なう (S 631)。なお、キャリア周波数に対応したスペクトル自体を切り出すのが難しい場合には、スペクトルの周辺領域の情報を切り出す。
- [0078] 次に、S 631 で切り出されたスペクトルを周波数空間の原点に移動させ、逆フーリエ変換を行う (S 632)。これにより、位相情報を有した複素数情報を得ることができる。
- [0079] 次に、S 632 で得られた複素数情報から微分位相像である位相 $\phi(x, y)$ を得る (S 633)。なお、S 631、S 632、S 633 を位相回復工程ということもある (S 630)。
- [0080] 次に、 $\phi(x, y)$ がラップされている場合には、アンラップ処理を行ない、真の $\phi(x, y)$ を得る (S 640)。このことを位相接続工程ということもある。なお、 $\phi(x, y)$ がラップされていない場合にはこの S 640 を省略することも可能である。ここで、 $\phi(x, y)$ は微分位相情報 (微分位相像) である。
- [0081] 次に、 $\phi(x, y)$ を積分することにより、位相像 $W(x, y)$ を取得する (S 650)。
- [0082] 以上のような構成によれば、少なくとも 1 枚の撮像から、被検体の位相像を取得することができる X 線撮像装置および X 線撮像方法を提供することが可能となる。また、上記の工程をコンピュータに実行させるプログラムを提供することも可能となる。
- [0083] (実施形態 2)

本発明によるX線撮像装置の第2の実施形態を図7を用いて説明する。本実施形態では、実施形態1で説明した図5（C）の空間周波数スペクトルよりも空間分解能を向上させる工夫がなされている。

[0084] 図7（B）は、本実施形態で説明する空間周波数スペクトルを示したものである。このような周波数スペクトルを得るためには干渉強度分布と吸収格子で生じる2次元のモアレの基本周期をX線検出器の画素周期の

[0085] [数10]

$$2\sqrt{2}\text{倍}$$

とし、モアレの方位を画素配列に対し45度傾けるように調整する。

[0086] 図7（A）は、このような状態におけるX線検出器上のモアレの強度分布を示している図である。710はX線検出器の受光面、720はモアレの明部、dはモアレの周期、PはX線検出器の画素周期である。なお、本実施形態では、市松模様の $\pi/2$ 位相格子（図2（A））と、市松模様の吸収格子（図3（B））を用いている。ただし、発生するモアレの強度分布が同一ならば、他の位相格子および吸収格子を用いてもよい。

[0087] 図7（B）は図7（A）のモアレの強度分布をFFT処理することによって得られた空間周波数スペクトルである。画素配列数を縦横ともにnとすれば、FFTにより得られるスペクトル空間も $n \times n$ の離散的なデータとなる。また、表現できる最大の周波数は、X線検出器170の画素周期をPとして $1/(2P)$ である。

[0088] 本実施形態ではモアレの基本周期は

[0089] [数11]

$$2\sqrt{2}P$$

であるからその周波数であるキャリア周波数の絶対値は

[0090] [数12]

$$1/(2\sqrt{2}P)$$

[0091] となる。またモアレの方位が45度傾いているので、スペクトル空間上で

[0092] [数13]

$$\text{周波数座標 } (f_x, f_y) = \left(\pm \frac{1}{4P}, \pm \frac{1}{4P} \right)$$

の位置にモアレの強度分布のキャリア周波数に対応するピークであるキャリアピーク711が生じる。

[0093] 4個のキャリアピーク711のうち隣り合う2個のピークについて、1辺が

[0094] [数14]

$$1 / (2\sqrt{2}P)$$

である45度傾いた正方形領域を切り出して実施形態1に記載の処理をすれば被検体の位相像を復元することができる。

[0095] この際、スペクトル領域をなるべく広く切り出すことで空間分解能を大きくすることができる。しかしながら、スペクトル空間にはキャリア周波数のピークの他に、キャリア周波数成分のピーク座標の和または差の位置に高周波成分とDC成分のピークである不要ピーク721が存在する。

[0096] 切り出し領域を広げすぎることにより、これらの不要ピーク721付近の領域まで含めてしまうと、不要ピーク721の影響で正確な位相像が得られなくなる。従って、切り出すスペクトル領域は、キャリア周波数のピークと不要ピーク721の中間線より内側の切り出し領域731としている。

[0097] 本実施形態で復元できる位相像の空間周波数は、切り出し領域731の大きさの1/2である。従って、図7(B)を見てわかるように画素配列方向の最大周波数は1/(4P)、45度方向の最大周波数は

[0098] [数15]

$$1 / (4\sqrt{2}P)$$

である。これを分解能として復元できる最小周期を画素単位で表現すれば、

最大周波数の逆数になるので画素配列方向で4画素、45度方向で

[0099] [数16]

$$4\sqrt{2} \text{ 画素} \div 5.7 \text{ 画素}$$

である。図5（C）の切り出し領域と比較すると、図7（B）の切り出し領域の方が、図5（C）の切り出し領域よりも広いため、復元できる空間周波数が多い。したがって、本実施形態によれば、上記実施形態と比較して空間分解能を向上させることが可能となる。

[0100] （実施形態3）

本発明によるX線撮像装置の第3の実施形態を図8を用いて説明する。本実施形態も、実施形態1で説明した図5（D）の空間周波数スペクトルよりも空間分解能を向上させる工夫がなされている。

[0101] 図8（B）は、本実施形態で説明する空間周波数スペクトルを示したものである。このような周波数スペクトルを得るためには干渉強度分布と吸収格子で生じる2次元のモアレの基本周期をX線検出器の画素周期の3倍とし、モアレの方位を画素配列に一致させる。

[0102] 図8（A）は、このような状態におけるX線検出器上のモアレの強度分布を示している図である。810はX線検出器の受光面、820はモアレの明部、dはモアレの周期、PはX線検出器の画素周期である。なお、本実施形態では、市松模様の π 位相格子（図2（A））と、網戸模様の吸収格子（図3（A））を用いている。ただし、発生するモアレの強度分布が同一ならば他の位相格子および吸収格子を用いてもよい。

[0103] 図8（A）は図8（B）に示したモアレの強度分布をFFT処理することによって得られた空間周波数スペクトルである。本実施形態ではモアレの基本周期は3Pであるから、そのキャリア周波数の絶対値は $1/(3P)$ となる。従って、スペクトル空間上で

[0104] [数17]

$$\text{周波数座標 } (f_x, f_y) = \left(\pm \frac{1}{3P}, 0 \right) \text{ または } \left(0, \pm \frac{1}{3P} \right)$$

のモアレの強度分布のキャリア周波数に対応するピークであるキャリアピーク 8 1 1 が生じる。実施形態 2 と同様に 4 個のキャリアピーク 8 1 1 のうち隣り合う 2 個のピークのうち、1 辺が $1 / (3 P)$ の正立した正方形領域を切り出して実施形態 1 に記載の処理をすれば被検体の位相像を復元することができる。

[0105] 本実施形態でも、スペクトル空間にはキャリア周波数のピークの他に、キャリア周波数成分のピーク座標の和または差の位置に高周波成分と DC 成分のピークである不要ピーク 8 2 1 が存在する。そのため、切り出すスペクトル領域は、キャリア周波数のピークと不要ピーク 8 2 1 の中間線より内側の切り出し領域 8 3 1 としている。

[0106] 本実施形態で復元できる位相像の空間周波数は、切り出し領域 8 3 1 の大きさの $1 / 2$ である。従って、図 8 (B) より、画素配列方向の最大周波数は $1 / (6 P)$ 、45 度方向の最大周波数は

[0107] [数18]

$$1 / (3 \sqrt{2} P)$$

である。これを分解能として復元できる最小周期を画素単位で表現すれば、最大周波数の逆数になるので画素配列方向で 6 画素、45 度方向で

[0108] [数19]

$$3 \sqrt{2} \text{ 画素} \div 4 = 2 \text{ 画素}$$

である。したがって、画素配列に対して 45 度方向の空間分解能において、本実施形態は実施形態 2 よりも優れている。

[0109] (実施形態 4)

本発明による X 線撮像装置の第 3 の実施形態を図 9 を用いて説明する。本実施形態の X 線撮像装置は、実施形態 1 から 3 記載の X 線撮像装置に検査物移動装置 9 0 0 を装備したものである。検査物移動装置 9 0 0 によって被検体 9 2 0 を X 線の光軸方向に移動させることができる。

[0110] X線検出器における被検体 9 2 0 の撮像倍率は、X線源 9 1 0 と吸収格子 9 4 0 の距離を L_1 、X線源 9 1 0 と吸収格子 9 4 0 の距離を L_2 とすれば L_1 / L_2 となる。

[0111] そのため、被検体 9 2 0 を位相格子 9 3 0 に近づければ L_2 が大きくなるため低倍率で撮像することができる。一方、X線源 9 1 0 に近づければ L_2 が小さくなるので高倍率で撮像することができる。

符号の説明

- [0112]
- | | |
|-------|-------|
| 1 1 0 | X線源 |
| 1 1 1 | X線 |
| 1 2 0 | 被検体 |
| 1 3 0 | 位相格子 |
| 1 5 0 | 吸収格子 |
| 1 5 1 | 透過部 |
| 1 5 2 | 遮光部 |
| 1 7 0 | X線検出器 |
| 1 8 0 | 演算装置 |

請求の範囲

- [請求項1] X線源と、
- 前記X線源からのX線を透過させることにより、タルボ効果による干渉強度分布を形成する位相格子と、
- 前記位相格子により形成された干渉強度分布の一部を遮光することによりモアレを生じさせる吸収格子と、
- 前記吸収格子により生じたモアレの強度分布を検出する検出器と、
- 前記検出器により検出されたモアレの強度分布から被検体の情報を画像化し、出力する演算装置を有し、
- 前記演算装置は、
- 前記検出器で取得したモアレの強度分布をフーリエ変換することにより、空間周波数スペクトルを取得するフーリエ変換工程と、
- 前記フーリエ変換工程により得られた空間周波数スペクトルから、キャリア周波数に対応したスペクトルを分離し、逆フーリエ変換を用いて微分位相像を取得する位相回復工程と、を実行するように構成されていることを特徴とするX線撮像装置。
- [請求項2] 前記演算装置は、前記位相回復工程により得られた微分位相像を積分することにより位相像を取得する工程を実行するように構成されている請求項1に記載のX線撮像装置。
- [請求項3] 前記演算装置は、前記位相回復工程により得られた微分位相像に対してアンラップ処理を行なう位相接続工程を実行するように構成されている請求項1に記載のX線撮像装置。
- [請求項4] 前記位相格子は、位相進行部と位相遅延部とが2次元的に周期的に配されている請求項1に記載のX線撮像装置。
- [請求項5] 前記位相格子は、前記位相進行部と前記位相遅延部とが市松状に配されている請求項4に記載のX線撮像装置。
- [請求項6] 前記位相格子は、前記位相進行部を透過したX線と、前記位相遅延部を透過したX線との位相差が $\pi/2$ または π となるように構成され

ている請求項 4 に記載の X 線撮像装置。

[請求項 7] 前記フーリエ変換工程で得られたスペクトル空間上において、前記検出器の画素周期を P としたときに、

[数 1]

$$\text{周波数座標 } (f_x, f_y) = \left(\pm \frac{1}{4P}, \pm \frac{1}{4P} \right)$$

の位置に前記キャリア周波数に対応したスペクトルが生じるように、前記位相格子、前記吸収格子、前記検出器が調整されていることを特徴とする請求項 1 に記載の X 線撮像装置。

[請求項 8] 前記吸収格子は、前記モアレの周期が

[数 2]

$$2\sqrt{2}P$$

でモアレの方位が前記検出器の画素配列に対し 45 度となるように配置され、

前記演算装置は、前記キャリア周波数に対応したスペクトルを分離するために、検出器で得られたモアレ画像の周波数空間から 1 辺が

[数 3]

$$1 / (2\sqrt{2}P)$$

で、画素配列方向に対し 45 度傾いた 2 つの正方形領域を切り出す工程を実行する請求項 7 に記載の X 線撮像装置。

[請求項 9] 前記フーリエ変換工程で得られたスペクトル空間上において、前記検出器の画素周期を P としたときに、

[数 4]

$$\text{周波数座標 } (f_x, f_y) = \left(\pm \frac{1}{3P}, 0 \right) \text{ または } \left(0, \pm \frac{1}{3P} \right)$$

の位置に前記キャリア周波数に対応したスペクトルが生じるように、

前記位相格子、前記吸収格子、前記検出器が調整されていることを特徴とする請求項 1 に記載の X 線撮像装置。

[請求項10] 前記吸収格子は、前記モアレの周期が $3P$ でモアレの方位が検出器の画素配列に一致するように配置され、

前記演算装置は、前記キャリア周波数に対応したスペクトルを分離するために、検出器で得られたモアレ画像の周波数空間から 1 辺が $1/(3P)$ で、画素配列方向に対し正立した 2 つの正方形領域を切り出す工程を実行する請求項 9 に記載の X 線撮像装置。

[請求項11] 前記被検体を X 線の光軸方向に移動させることが可能な検査物移動装置を有する請求項 1 に記載の X 線撮像装置。

[請求項12] X 線撮像装置において用いる X 線撮像方法であって、

X 線を透過させることにより、タルボ効果による干渉強度分布を形成する工程と、

前記干渉強度分布の一部を遮光することによりモアレを生じさせる工程と、

前記モアレの強度分布を検出する工程と、

前記モアレの強度分布をフーリエ変換することにより、空間周波数スペクトルを取得する工程と、

前記空間周波数スペクトルから、キャリア周波数に対応したスペクトルを分離し、逆フーリエ変換を用いて微分位相像を取得する工程と、

前記微分位相像を積分することにより、位相像を得る工程とを有することを特徴とする X 線撮像方法。

[請求項13] コンピュータに、

X 線を透過させることにより、タルボ効果による干渉強度分布を形成する工程と、

前記干渉強度分布の一部を遮光することによりモアレを生じさせる工程と、

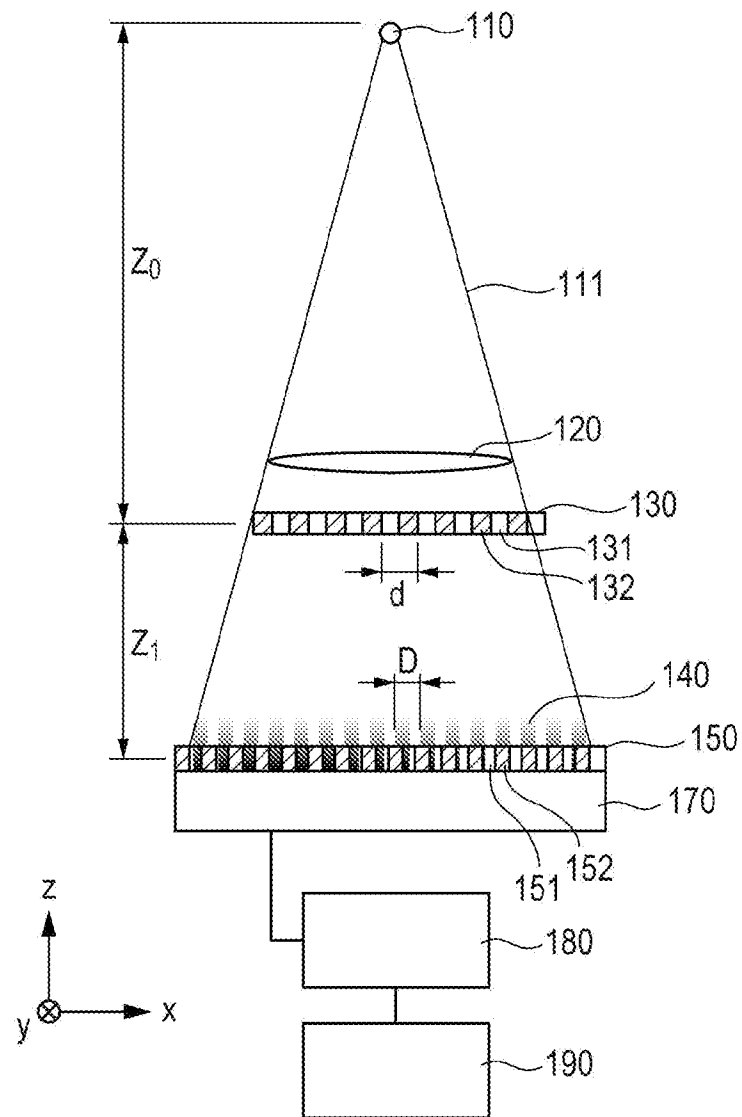
前記モアレの強度分布を検出する工程と、

前記モアレの強度分布をフーリエ変換することにより、空間周波数スペクトルを取得する工程と、

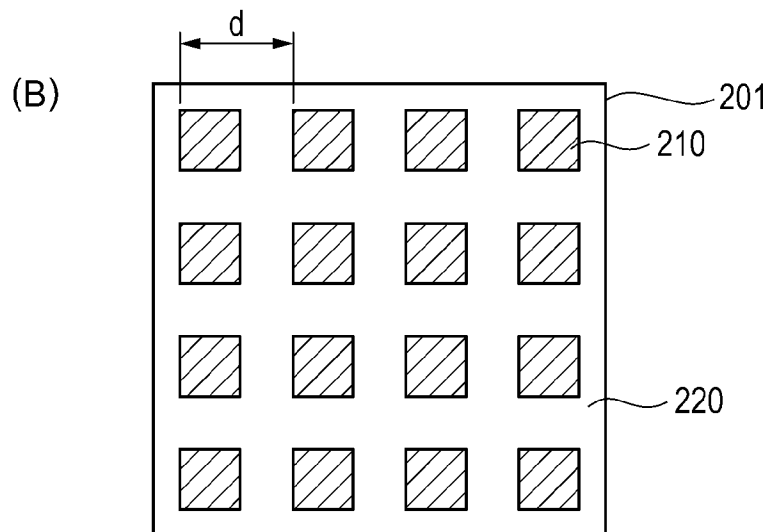
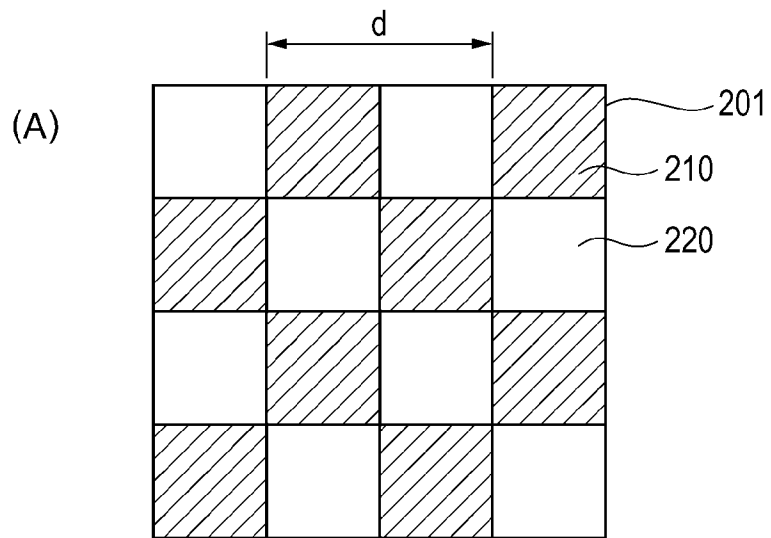
前記空間周波数スペクトルから、キャリア周波数に対応したスペクトルを分離し、逆フーリエ変換を用いて微分位相像を得る工程と、

前記微分位相像を積分することにより、位相像を得る工程と、
を実行させることを特徴とするプログラム。

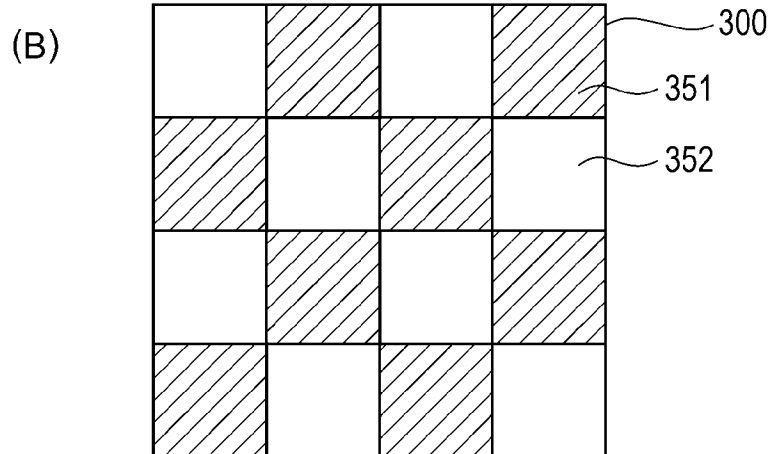
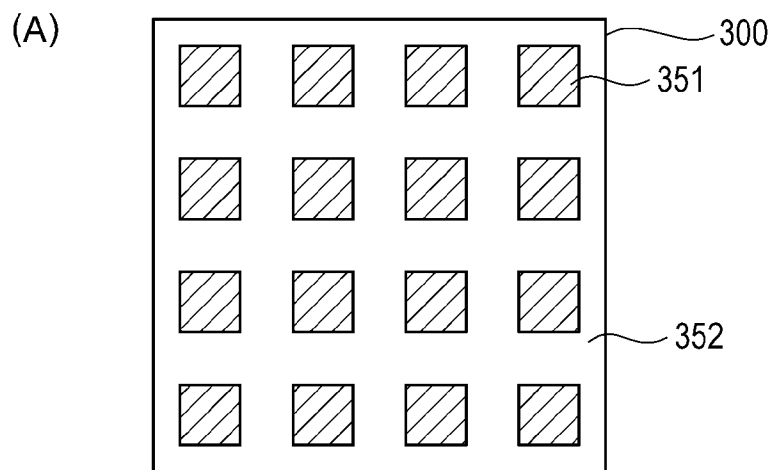
[図1]



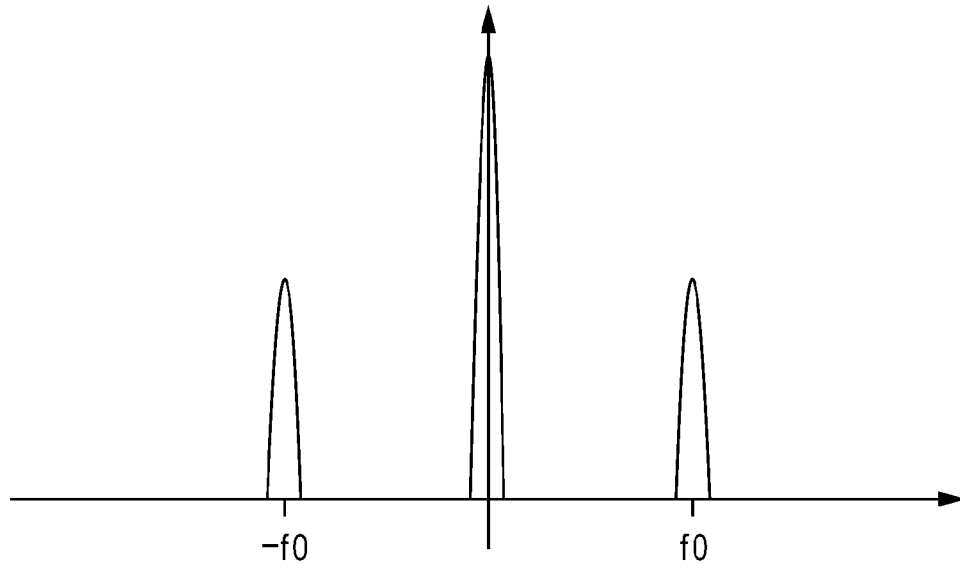
[図2]



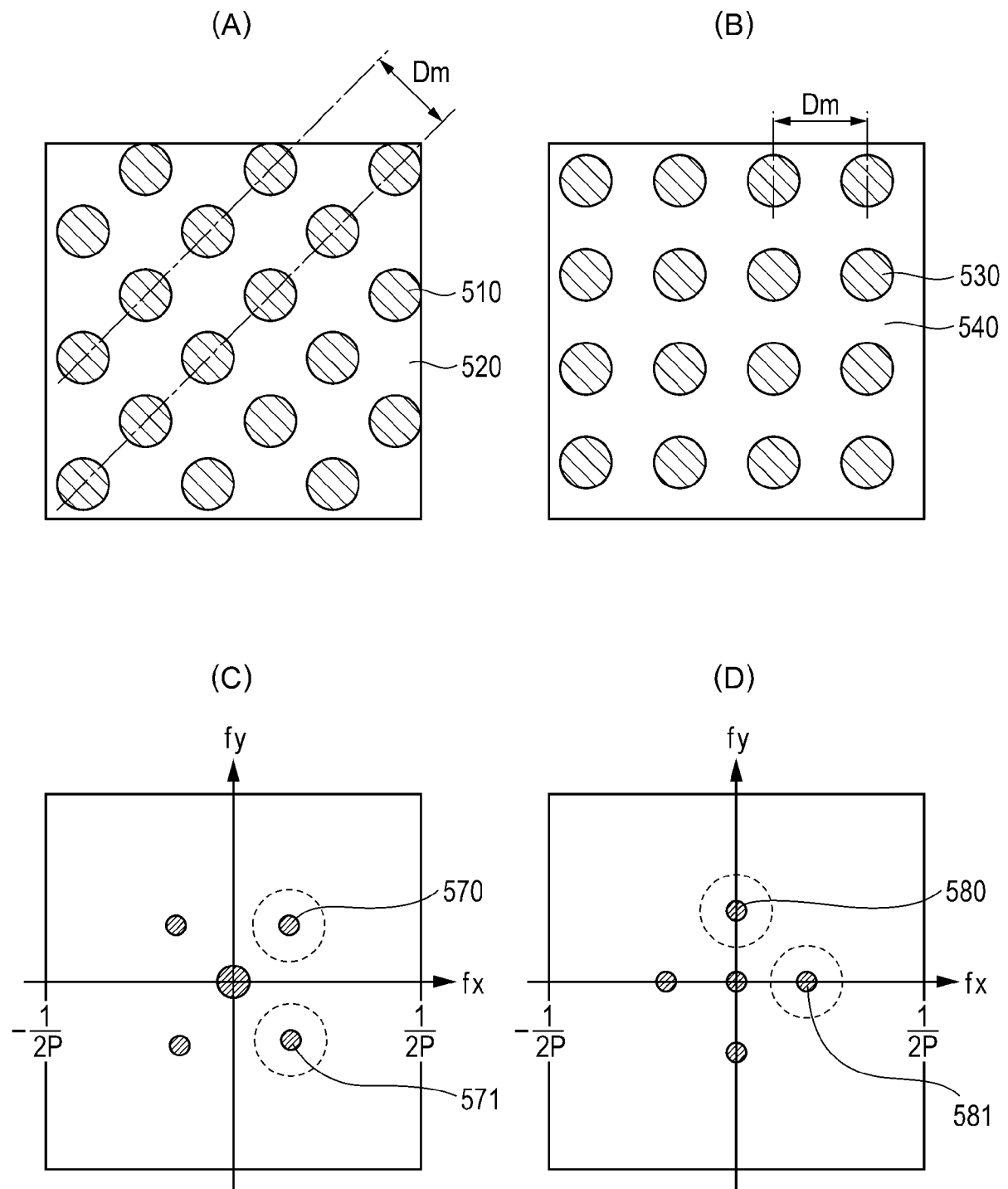
[図3]



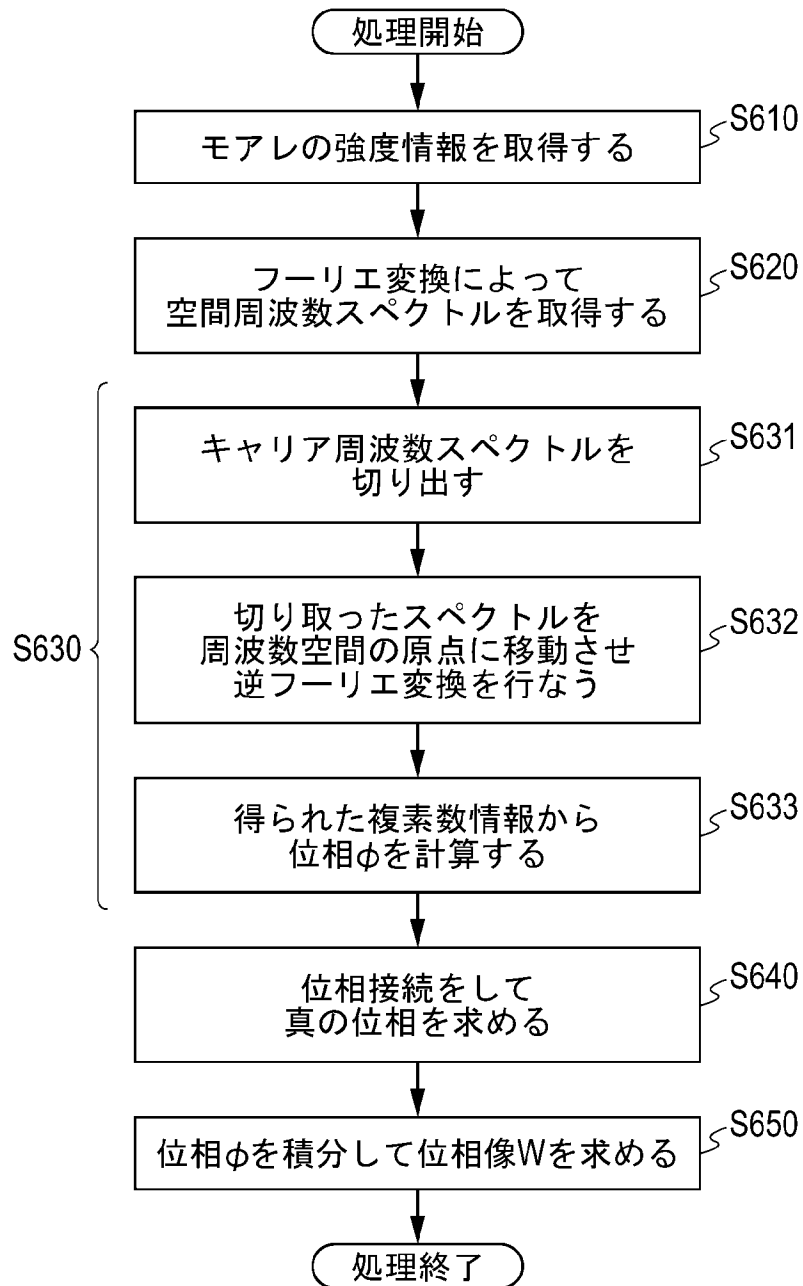
[図4]



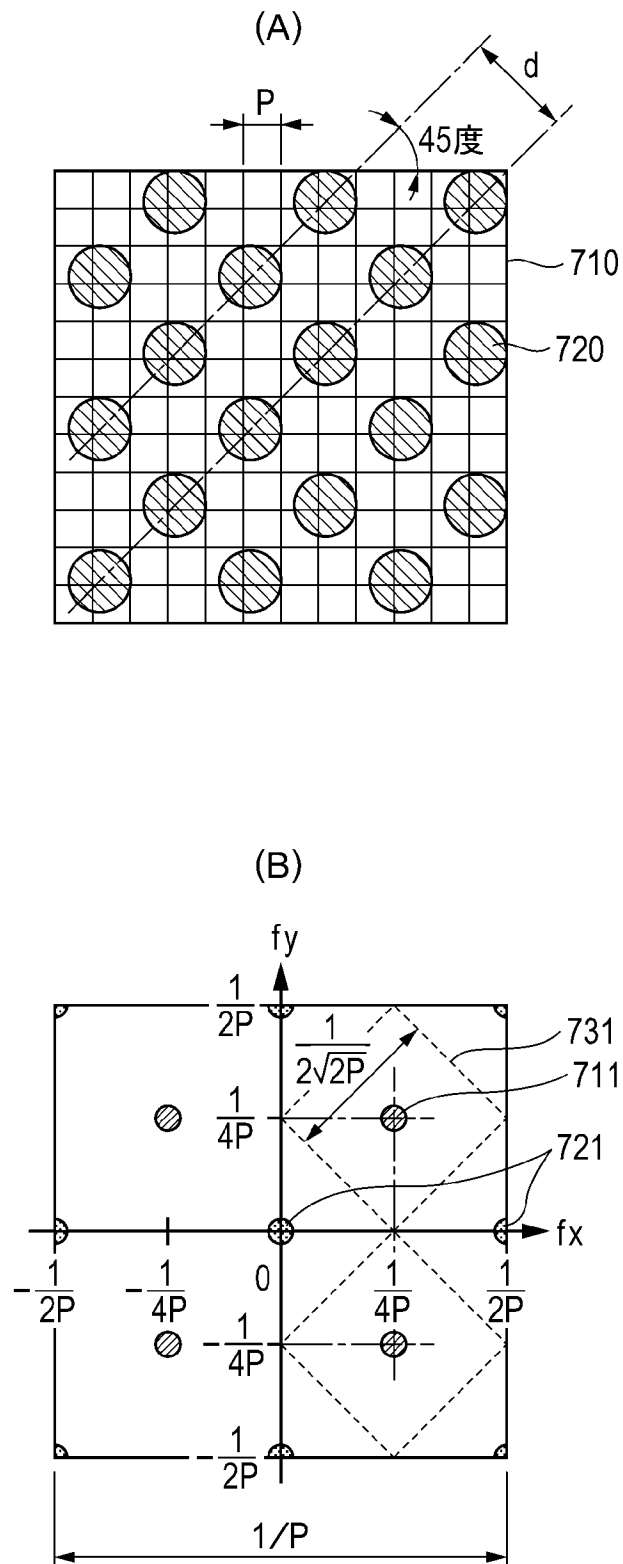
[図5]



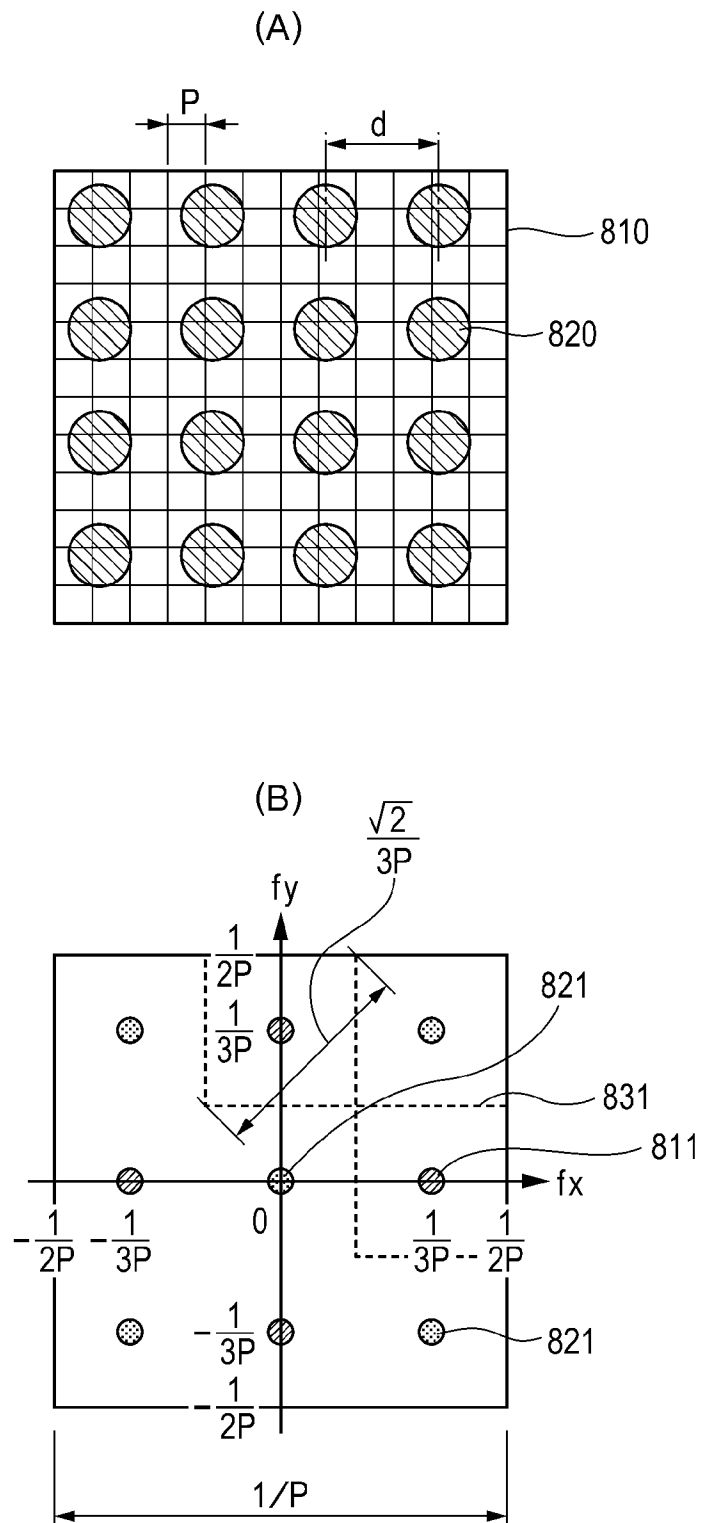
[図6]



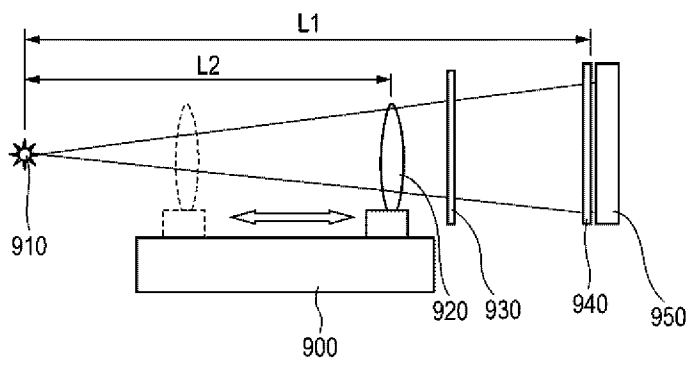
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/068434

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N23/04 (2006.01) i, A61B6/00 (2006.01) i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N23/00-23/227, A61B6/00-6/14

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

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2009

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2009 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2009

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

WPI, JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2005-152500 A (Hitachi, Ltd.), 16 June 2005 (16.06.2005), paragraphs [0009], [0038], [0039], [0052] to [0056]	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2003-90807 A (Hitachi, Ltd.), 28 March 2003 (28.03.2003), paragraphs [0015], [0026] to [0031]	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2008-26098 A (Hitachi, Ltd.), 07 February 2008 (07.02.2008), paragraphs [0011], [0044] to [0048]	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2009-244260 A (Canon Inc.), 22 October 2009 (22.10.2009), paragraphs [0005] to [0012], [0050] to [0052]; fig. 5, 9	1-6, 11-13 7-10

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

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
18 December, 2009 (18.12.09)Date of mailing of the international search report
12 January, 2010 (12.01.10)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/068434

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2008-200360 A (Konica Minolta Medical & Graphic, Inc.), 04 September 2008 (04.09.2008), paragraph [0173]	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2008-200359 A (Konica Minolta Medical & Graphic, Inc.), 04 September 2008 (04.09.2008), paragraph [0078]	1-6, 11-13 7-10
Y A	WO 2004/058070 A1 (Atsushi MOMOSE), 15 July 2004 (15.07.2004), page 9, lines 4 to 6	1-6, 11-13 7-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2009/068434

JP 2005-152500 A	2005.06.16	US 2005/117699 A1	2005.06.02
		US 7113564 B2	2006.09.26
JP 2003-090807 A	2003.03.28	JP 4015394 B2	2007.11.28
JP 2008-026098 A	2008.02.07	US 2008/019482 A1	2008.01.24
		US 7499520 B2	2009.03.03
JP 2009-244260 A	2009.10.22	WO 2009/113726 A2	2009.09.17
		WO 2009/113726 A3	2009.12.03
JP 2008-200360 A	2008.09.04	(Family: none)	
JP 2008-200359 A	2008.09.04	(Family: none)	
WO 2004/058070 A1	2004.07.15	AU 2003292785 A1	2004.07.22
		EP 1623671 A1	2006.02.08
		EP 1623671 A4	2008.11.05
		US 2005/286680 A1	2005.12.29
		US 7180979 B2	2007.02.20

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. G01N23/04(2006.01)i, A61B6/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. G01N23/00-23/227, A61B6/00-6/14

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 0 9 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 0 9 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 0 9 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)

WPI, JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)

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
Y A	JP 2005-152500 A (株式会社日立製作所) 2005.06.16, 【0009】, 【0038】, 【0039】, 【0052】 - 【0056】	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2003-90807 A (株式会社日立製作所) 2003.03.28, 【0015】, 【0026】 - 【0031】	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2008-26098 A (株式会社日立製作所) 2008.02.07, 【0011】, 【0044】 - 【0048】	1-6, 11-13 7-10

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

1 8 . 1 2 . 2 0 0 9

国際調査報告の発送日

1 2 . 0 1 . 2 0 1 0

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

横尾 雅一

2W

4 4 6 2

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 2

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2009-244260 A (キヤノン株式会社) 2009. 10. 22, 【0005】-【0012】, 【0050】 - 【0052】 , 図 5, 図 9	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2008-200360 A (コニカミノルタエムジー株式会社) 2008. 09. 04, 【0173】	1-6, 11-13 7-10
Y A	JP 2008-200359 A (コニカミノルタエムジー株式会社) 2008. 09. 04, 【0078】	1-6, 11-13 7-10
Y A	WO 2004/058070 A1 (百生 敦) 2004. 07. 15, 第 9 頁第 4-6 行	1-6, 11-13 7-10

JP 2005-152500 A	2005. 06. 16	US 2005/117699 A1	2005. 06. 02
-----	-----	US 7113564 B2	2006. 09. 26
JP 2003-090807 A	2003. 03. 28	JP 4015394 B2	2007. 11. 28
-----	-----	-----	-----
JP 2008-026098 A	2008. 02. 07	US 2008/019482 A1	2008. 01. 24
-----	-----	US 7499520 B2	2009. 03. 03
JP 2009-244260 A	2009. 10. 22	WO 2009/113726 A2	2009. 09. 17
-----	-----	WO 2009/113726 A3	2009. 12. 03
JP 2008-200360 A	2008. 09. 04	(ファミリーなし)	-----
-----	-----	-----	-----
JP 2008-200359 A	2008. 09. 04	(ファミリーなし)	-----
-----	-----	-----	-----
WO 2004/058070 A1	2004. 07. 15	AU 2003292785 A1	2004. 07. 22
-----	-----	EP 1623671 A1	2006. 02. 08
		EP 1623671 A4	2008. 11. 05
		US 2005/286680 A1	2005. 12. 29
		US 7180979 B2	2007. 02. 20
-----	-----	-----	-----