

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4025880号
(P4025880)

(45) 発行日 平成19年12月26日(2007.12.26)

(24) 登録日 平成19年10月19日(2007.10.19)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 B 11/00 (2006.01)	GO 1 B 11/00 G
GO 1 B 9/021 (2006.01)	GO 1 B 9/021
GO 1 J 9/02 (2006.01)	GO 1 J 9/02
GO 3 H 1/04 (2006.01)	GO 3 H 1/04

請求項の数 3 (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2005-256714 (P2005-256714)	(73) 特許権者 504145283 国立大学法人 和歌山大学 和歌山県和歌山市栄谷930番地
(22) 出願日 平成17年9月5日(2005.9.5)	
(65) 公開番号 特開2007-71593 (P2007-71593A)	(74) 代理人 100147485 弁理士 杉村 憲司
(43) 公開日 平成19年3月22日(2007.3.22)	(74) 代理人 100113745 弁理士 藤原 英治
審査請求日 平成17年9月5日(2005.9.5)	(74) 代理人 100072051 弁理士 杉村 興作
特許法第30条第1項適用 平成17年3月9日 日本 実験力学会発行の「日本実験力学会講演論文集 No. 5 (2005)」に発表	(74) 代理人 100101096 弁理士 徳永 博
	(74) 代理人 100086645 弁理士 岩佐 義幸
	(74) 代理人 100107227 弁理士 藤谷 史朗

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法及び変位分布計測方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法において、
球面波参照光の位相を所定量だけ順次シフトさせながら物体の像を2次元撮像装置により5回撮像し、5つの干渉縞をデジタルデータとして記録してデジタルホログラムを作成する工程と、

このようにして得られた5つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記2次元撮像装置の撮像素子面上での複素振幅分布を得る工程と、

前記撮像素子面上での複素振幅分布からフレネル変換によって物体面の複素振幅分布を得る工程とを具えることを特徴とする、球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法。

【請求項2】

物体の像を位相シフトデジタルホログラフィによりデジタルホログラムとして記録し、記録したデジタルホログラムから物体の変位分布ないし変形分布を位相情報として計測する変位分布計測方法において、

第1の状態において、球面波参照光の位相を所定量だけ順次シフトさせながら物体の像を2次元撮像装置により5回撮像し、5つの干渉縞をデジタルデータとして記録して第1の状態におけるデジタルホログラムを作成する工程と、

第1の状態から前記物体が変形又は変位した第2の状態において、球面波参照光の位相を所定量だけシフトさせながら前記物体の像を2次元撮像装置により5回撮像し、5つの

干渉縞をデジタルデータとして記録して第 2 の状態におけるデジタルホログラムを作成する工程と、

前記第 1 の状態について得られた 5 つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記 2 次元撮像装置の撮像素子面上での前記第 1 の状態についての複素振幅分布を得る工程と、

前記撮像素子面上での前記第 1 の状態についての複素振幅分布からフレネル変換によって前記第 1 の状態についての物体面の複素振幅分布を得る工程と、

前記第 2 の状態について得られた 5 つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記 2 次元撮像装置の撮像素子面上での前記第 2 の状態についての複素振幅分布を得る工程と、

前記撮像素子面上での前記第 2 の状態についての複素振幅分布からフレネル変換によって前記第 2 の状態についての物体面の複素振幅分布を得る工程と、

前記第 1 の状態についての物体面の複素振幅分布と前記第 2 の状態についての物体面の複素振幅分布から位相差分布を得る工程とを具えることを特徴とする変位分布計測方法。

【請求項 3】

物体の像を位相シフトデジタルホログラフィによりデジタルホログラムとして記録し、記録したデジタルホログラムから物体の変位分布ないし変形分布を位相情報として計測する変位分布計測装置において、

物体を撮像する 2 次元撮像手段と、

球面波参照光を発生する手段と、

前記球面波参照光を位相シフトさせる手段と、

前記位相シフトされる球面波参照波を前記 2 次元撮像手段に入射させる手段と、

コンピュータと、

を具え、

前記 2 次元撮像手段が、

第 1 の状態において、球面波参照光の位相を所定量だけ、前記位相シフトさせる手段によって、順次シフトさせながら物体の像を 5 回撮像して、5 つの干渉縞を取得し、

前記第 1 の状態から前記物体が変形又は変位した第 2 の状態において、球面波参照光の位相を所定量だけ、前記位相シフトさせる手段によって、シフトさせながら前記物体の像を 5 回撮像して、5 つの干渉縞を取得し、

前記コンピュータが、

前記第 1 の状態において取得された 5 つの干渉縞をデジタルデータとして記録して第 1 の状態におけるデジタルホログラムを作成し、

前記第 2 の状態において取得された 5 つの干渉縞をデジタルデータとして記録して第 2 の状態におけるデジタルホログラムを作成し、

前記第 1 の状態において取得された 5 つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記 2 次元撮像手段の撮像素子面上での前記第 1 の状態についての複素振幅分布を取得し、

前記撮像素子面上での前記第 1 の状態についての複素振幅分布からフレネル変換によって前記第 1 の状態についての物体面の複素振幅分布を取得し、

前記第 2 の状態において取得された 5 つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記 2 次元撮像手段の撮像素子面上での前記第 2 の状態についての複素振幅分布を取得し、

前記撮像素子面上での前記第 2 の状態についての複素振幅分布からフレネル変換によって前記第 2 の状態についての物体面の複素振幅分布を取得し、

前記第 1 の状態についての物体面の複素振幅分布と前記第 2 の状態についての物体面の複素振幅分布から位相差分布を取得する、

ことを特徴とする変位分布計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法と、球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィを用いる変位分布計測方法及び装置に関するものである。

10

20

30

40

50

【背景技術】

【0002】

光学的手法を用いた画像計測は、非接触で物体の形状や変形、応力、歪み等の計測を全視野で行うことができる手法であり、情報通信、医療等の種々の分野に利用することができる。物体表面の変位分布ないし変形分布を計測する方法として、位相シフトデジタルホログラフィを利用した計測方法が既知である（例えば、非特許文献1参照）。この位相シフトデジタルホログラフィを利用した計測方法では、物体の変位前後の干渉像をCCDカメラにより撮像し、物体表面の各部位の位相分布をデジタルデータとして計測している。従って、分布表面の変形量や変位量を高速で計測することができ、物体表面の微小変位量を高速で計測する必要のある種々の用途に適用することができる。

10

【0003】

例えば特許文献1に記載の発明は、物体の像を位相シフトデジタルホログラフィによりデジタルホログラムとして記録し、記録したデジタルホログラムから物体の変位分布ないし変形分布を位相情報として計測する変位分布計測方法であり、位相情報を求めるため高精度に変位計測が可能である。しかしながら、参照光を平行光にする必要があるため、光学系が複雑になるという問題があった。非特許文献2に記載の方法は、光学系が比較的簡単である。しかしながら、計測物体をCCDカメラに結像させる必要があり、計測精度の点でもホログラフィ干渉法より劣っている。

【特許文献1】特願2004-074444号公報

【非特許文献1】実験力学論文集, Vol.3 No2「位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測」, 2003年6月

20

【非特許文献2】スペckルを用いた面外変位計測装置の開発、内野正和、原田豊満、永井誠、小金丸正明、福岡県工業技術センター研究報告、p119-121、No.12(2002)

【非特許文献3】Carre, P.: Installation et utilisation du compateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures, Metrologia 2, (1966), 13-23

【非特許文献4】Novak, J.: Five-step phase-shifting algorithms with unknown values of phase shift, Optik, 114-2 (2003), 63-68

【発明の開示】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

光学的編画像解析手法において位相解析を行うことは、物体を高精度に解析するために非常に有用である。波長が一定なガスレーザーなどを用いて2光波の干渉による物体の変位を計測する場合、参照光の位相をシフトさせ位相解析を行う。しかし位相シフト装置にPZTを用いるため装置は非常に高価となる。また2種類以上のレーザーを用いて3次元変位計測などを行う際、物体光と参照光の光路差を同じだけ変化させてもレーザーの波長によって位相のシフト量が異なる。そのためレーザーの波長に合わせたPZTとPZTコントローラが必要になり、光学系が複雑かつ高価になるという問題があった。

【0005】

40

他方において、位相シフト量が未知であっても等間隔であれば位相を求めることができる手法としてCarreアルゴリズムが提案されている（非特許文献3参照）。また、この手法を発展させ、背景輝度を加味した新しい位相シフト手法が近年提案されている（非特許文献4参照）。この手法は位相を $p/2$ ずつシフトさせる必要はなく、等間隔にシフトした5枚の画像から強度分布と位相分布を検出することができる。またこの手法は、5枚の画像において位相が等間隔にシフトすればよいので、位相を1周期変化させる必要がない。

【0006】

上述したことを鑑み、本発明は、球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法と、球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィを用いる変位分

50

布計測方法及び装置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】

本発明による球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法は、球面波参照光の位相を所定量だけ順次シフトさせながら物体の像を2次元撮像装置により5回撮像し、5つの干渉縞をデジタルデータとして記録してデジタルホログラムを作成する工程と、

このようにして得られた5つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記2次元撮像装置の撮像素子面上での複素振幅分布を得る工程と、

前記撮像素子面上での複素振幅分布からフレネル変換によって物体面の複素振幅分布を得る工程とを具えることを特徴とする。 10

【0008】

本発明による、物体の像を位相シフトデジタルホログラフィによりデジタルホログラムとして記録し、記録したデジタルホログラムから物体の変位分布ないし変形分布を位相情報として計測する変位分布計測方法は、

物体の像を位相シフトデジタルホログラフィによりデジタルホログラムとして記録し、記録したデジタルホログラムから物体の変位分布ないし変形分布を位相情報として計測する変位分布計測方法において、

第1の状態において、球面波参照光の位相を所定量だけ順次シフトさせながら物体の像を2次元撮像装置により5回撮像し、5つの干渉縞をデジタルデータとして記録して第1の状態におけるデジタルホログラムを作成する工程と、 20

第1の状態から前記物体が変形又は変位した第2の状態において、球面波参照光の位相を所定量だけシフトさせながら前記物体の像を2次元撮像装置により5回撮像し、5つの干渉縞をデジタルデータとして記録して第2の状態におけるデジタルホログラムを作成する工程と、

前記第1の状態について得られた5つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記2次元撮像装置の撮像素子面上での前記第1の状態についての複素振幅分布を得る工程と、

前記撮像素子面上での前記第1の状態についての複素振幅分布からフレネル変換によって前記第1の状態についての物体面の複素振幅分布を得る工程と、

前記第2の状態について得られた5つの前記干渉縞に等速位相シフト法を用いて前記2次元撮像装置の撮像素子面上での前記第2の状態についての複素振幅分布を得る工程と、 30

前記撮像素子面上での前記第2の状態についての複素振幅分布からフレネル変換によって前記第2の状態についての物体面の複素振幅分布を得る工程と、

前記第1の状態についての物体面の複素振幅分布と前記第2の状態についての物体面の複素振幅分布から位相差分布を得る工程とを具えることを特徴とする。

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、位相シフトデジタルホログラフィを用いた変位計測光学系が簡略化し、装置への組み込みが容易になる。さらに、物体と2次元撮像装置の距離を離すことができるのでレーザの照射範囲が大きくなり、より大きな物体を計測することが可能になる。 40

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

初めに、位相シフトデジタルホログラフィの原理について説明する。図1は本発明による位相シフトデジタルホログラフィを利用した物体表面の変位分布計測方法を実施するための記録光学系の一例を示す線図である。コヒーレント光を発生するレーザ光源1から光ビームを放出する。光ビームは、空間フィルタ2を通過した後、球面波光のままハーフミラー3により分割され、反射光ビームは計測されるべき物体4に入射する。物体4の表面で反射した散乱光は、物体光としてハーフミラー3を透過し、CCDカメラ5に向けて伝搬する。一方、ハーフミラー3を透過した光ビームは、しぼり6と減光フィルタ7を通過した後、PZTステージ8に装着された全反射ミラー9に入射する。全反射ミラー9で反 50

射した光ビームは参照光となり、ハーフミラー3で反射し、CCDカメラ5に向けて伝搬する。物体光と参照光は互いに干渉しあい、CCDカメラ5には干渉縞が撮像される。そして、CCDカメラにより撮像された干渉縞はデジタルデジタルとして記録され、その出力データは、コンピュータ(図示せず)に転送され、信号処理が行われる。

【0011】

CCD面における複素振幅分布の算出原理について説明する。CCD面での物体光と参照光の複素振幅分布を $A_o(X, Y)$ 、 $A_r(X, Y)$ とするとそれぞれ式(1)、(2)で示される。

【数1】

$$A_o(X, Y) = a_o(X, Y) \exp i \Phi_o(X, Y) \quad (1) \quad 10$$

【数2】

$$A_r(X, Y) = a_r(X, Y) \exp i \{ \Phi_r(X, Y) - k \Delta L + \alpha \} \quad (2)$$

ここで、 $a_o(X, Y)$ 、 $a_r(X, Y)$ はそれぞれ物体光と参照光の複素振幅であり、 $\Phi_o(X, Y)$ 、 $\Phi_r(X, Y)$ はそれぞれ物体光と参照光に平行光を用いた場合の参照光の位相分布である。 ΔL はシフトされる参照光の位相である。ここで L は、

【数3】

$$\Delta L = \sqrt{X^2 + Y^2 + L^2} - L \quad (3) \quad 20$$

である。図2は、球面波参照光がCCD面に伝播する様子を示す線図である。CCD面における複素振幅分布を、

【数4】

$$g(X, Y) = a(X, Y) \exp i \Phi(X, Y) \quad (4)$$

とすると、振幅分布と位相分布は式(5)、(6)で示される。

【数5】

$$a(X, Y) = a_o(X, Y) a_r(X, Y) \quad (5) \quad 30$$

【数6】

$$\Phi(X, Y) = \Phi_o(X, Y) - \{ \Phi_r(X, Y) - k \Delta L \} \quad (6)$$

このとき、参照光は平行光なので $a_r(X, Y)$ は一定で、また $\Phi_r(X, Y) = 0$ とすることができるのでCCD面における振幅分布と位相分布は式(7)、(8)で表すことができる。

【数7】

$$a(X, Y) = c \cdot a_o(X, Y) \quad (7) \quad 40$$

【数8】

$$\Phi(X, Y) = \Phi_o(X, Y) + k \Delta L \quad (8)$$

ここで c は定数である。これら $a(X, Y)$ 、 $\Phi(X, Y)$ を求めるのだが、参照光が球面波であるため位相のシフト量が場所によって変化する。そのため以下に示す等速位相シフト法を用いる。

【0012】

等速位相シフト法の原理について説明する。従来の位相シフト法が位相を $\pi/2$ ずつシフトさせ初期位相を検出するのに対し、等速位相シフト法は位相を等間隔に5ステップシ

フトさせ位相分布を検出する。図3は、等速位相シフト法の位相のシフト量を示す線図である。等速位相シフト法は I_2 での位相を求める位相とし、1ステップごとに $\pi/2 + \psi$ シフトする。 $I_0 \sim I_4$ は式(9)～(13)で示される。

【数9】

$$I_0 = a \cos(\Phi - \pi - 2\psi) + b \quad (9)$$

【数10】

$$I_1 = a \cos(\Phi - \frac{\pi}{2} - \psi) + b \quad (10)$$

10

【数11】

$$I_2 = a \cos \Phi + b \quad (11)$$

【数12】

$$I_3 = a \cos(\Phi + \frac{\pi}{2} + \psi) + b \quad (12)$$

【数13】

$$I_4 = a \cos(\Phi + \pi + 2\psi) + b \quad (13)$$

20

ここで、 a は輝度振幅、 b は背景輝度を表している。これらの式から a と ψ は式(14)、(15)となる。

【数14】

$$a = \frac{2(I_1 - I_3) \sqrt{(I_1 - I_3)^2 - (I_0 - I_2)(I_2 - I_4)}}{4(I_1 - I_3)^2 - (I_0 - I_4)^2} \quad (14)$$

【数15】

$$\tan \Phi = \frac{\sqrt{4(I_1 - I_3)^2 - (I_0 - I_4)^2}}{2I_2 - (I_0 + I_4)} \quad (15)$$

30

また ψ は式(16)となる。

【数16】

$$\sin \psi = \frac{I_0 - I_4}{2(I_1 - I_3)} \quad (16)$$

これらの式から位相分布と振幅分布を検出することができる。

【0013】

40

物体面における複素振幅分布の算出について説明する。参照光に球面波を用いた場合、CCD面における複素振幅分布は式(17)で示される。

【数17】

$$g(X, Y) = a_o(X, Y) \exp i\{\Phi_o(X, Y) + k\Delta L\} \quad (17)$$

そのためフレネル変換は、

【数 18】

$$\begin{aligned}
 u(x, y) &= \exp\left[ik \frac{(x^2 + y^2)}{2R}\right] \mathcal{F} \left[g(X, Y) \exp\left\{ik \frac{(X^2 + Y^2)}{2R}\right\}\right] \\
 &= \exp\left[ik \frac{(x^2 + y^2)}{2R}\right] \mathcal{F} \left[A_o(X, Y) \exp\left\{ik \left(\frac{(X^2 + Y^2)}{2R} + \Delta L\right)\right\}\right] \\
 &= \exp\left[ik \frac{(x^2 + y^2)}{2R}\right] \mathcal{F} \left[A_o(X, Y) \exp\left\{ik \left(\frac{(X^2 + Y^2)}{2R} + \sqrt{X^2 + Y^2 + L^2} - L\right)\right\}\right] \\
 &= \exp\left[ik \frac{(x^2 + y^2)}{2R}\right] \mathcal{F} \left[A_o(X, Y) \exp\left\{ik \frac{(X^2 + Y^2)}{2R'}\right\}\right]
 \end{aligned} \tag{18}$$

と変形できる。このとき、 R' は式 (19) で示される。

【数 19】

$$R' = \frac{LR}{(L-R)} \tag{19}$$

図 4 は、このときの参照面と物体面と点光源の関係を示す線図である。

【0014】

本発明の変位計測方法による変位計測の手順を説明する。

(1) 球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生

(i) 図 1 に示す光学系で物体の位相シフトした 5 枚の干渉縞を記録する。

(ii) 得られた 5 枚の干渉縞に等速位相シフト法を用いて CCD 面上での複素振幅分布を得る。

(iii) 式 (18) のフレネル変換で物体面の複素振幅分布を得る。

(2) 球面波参照光を用いた位相シフトデジタルホログラフィの変位計測

(i) 図 1 に示す光学系で変位前の位相シフトした 5 枚の干渉縞を記録する。物体を変位させ、同様に変位後の位相シフトした 5 枚の干渉縞を記録する。

(iii) 変位前、変位後の像を上記の方法で再生し、位相の差をとる。図 5 a は、このようにして得られた変位前の再生像を示す画像であり、図 5 b は変位後の再生像を示す画像である。図 6 は、位相差分布を示す画像である。図 6 から本発明により変位計測が可能となることわかる。

【0015】

本明細書中の Carre、photoelectrique、interferential は、それぞれ Carré

、photoélectrique

、interférential

に置き換えられたい。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図 1】本発明による位相シフトデジタルホログラフィを利用した変位分布計測方法を実施するための光学系の一例を示す線図である。

【図 2】球面波参照光が CCD 面に伝播する様子を示す線図である。

【図 3】等速位相シフト法の位相のシフト量を示す線図である。

【図 4】参照面と物体面と点光源の関係を示す線図である。

【図 5】a は変位前の再生像を示す画像であり、b は変位後の再生像を示す画像である。

【図 6】位相差分布を示す画像である。

【符号の説明】

【0017】

1 レーザ光源

10

20

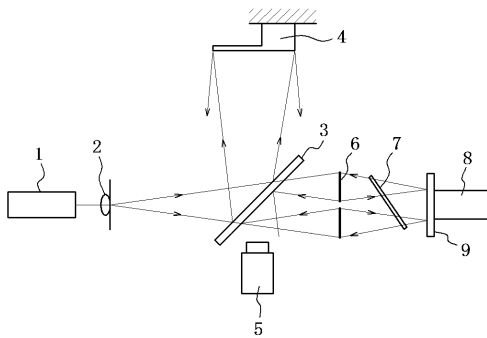
30

40

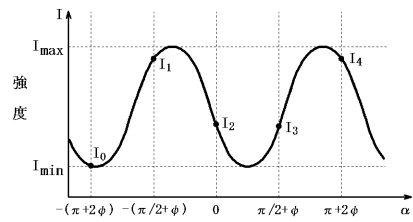
50

- 2 空間フィルタ
- 3 ハーフミラー
- 4 計測物体
- 5 CCDカメラ
- 6 しぼり
- 7 減光フィルタ
- 8 P Z Tステージ
- 9 ミラー

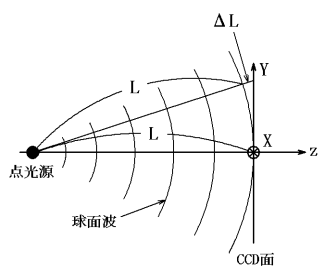
【 図 1 】



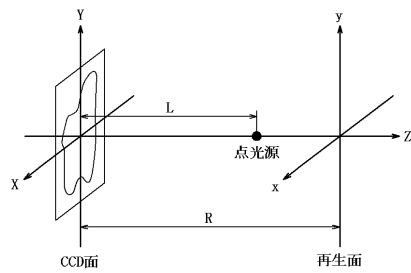
【 図 3 】



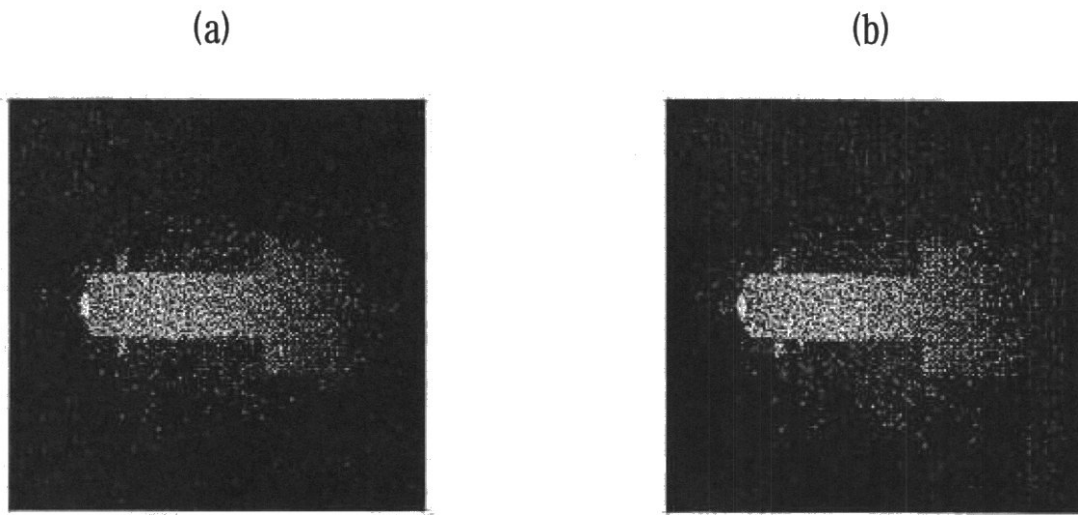
【 図 2 】



【 図 4 】

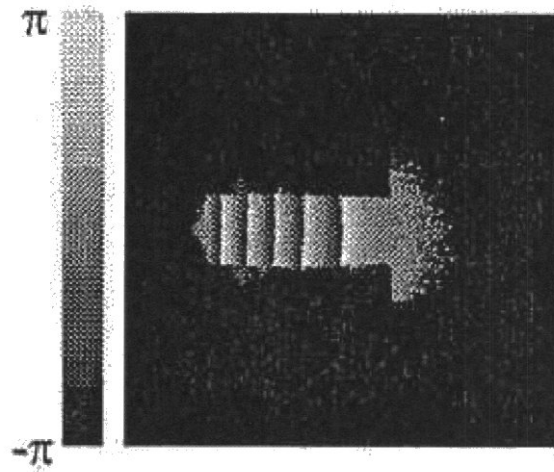


【 図 5 】



変位前後の再生像

【 図 6 】



変位前後の位相差分布

フロントページの続き

- (74)代理人 100114292
弁理士 来間 清志
- (74)代理人 100119530
弁理士 富田 和幸
- (72)発明者 森本 吉春
大阪府泉南郡田尻町りんくうポート北5 - 17
- (72)発明者 藤垣 元治
和歌山県和歌山市木ノ本1496 - 164
- (72)発明者 松井 徹
和歌山県和歌山市木ノ本176 - 5
- (72)発明者 喜多 俊行
大阪府阪南市尾崎町8 - 29 - 18

審査官 小野寺 麻美子

- (56)参考文献 特開平10 - 268740 (JP, A)
特開2005 - 265441 (JP, A)
特開2005 - 283683 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00
G01B 9/021
G01J 9/02
G03H 1/04