

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

特許第3536097号

(P3536097)

(45)発行日 平成16年6月7日(2004.6.7)

(24)登録日 平成16年3月26日(2004.3.26)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

G 0 1 B 11/25
11/24

G 0 1 B 11/24

E
K

請求項の数 3 (全 10 頁)

(21)出願番号 特願2002-57776(P2002-57776)

(22)出願日 平成14年3月4日(2002.3.4)

(65)公開番号 特開2003-254732(P2003-254732A)

(43)公開日 平成15年9月10日(2003.9.10)

審査請求日 平成14年3月4日(2002.3.4)

(73)特許権者 396019376
和歌山大学長
和歌山県和歌山市栄谷930

(72)発明者 池田 泰之
和歌山県和歌山市中之島1774

(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694-1

(72)発明者 米山 聡
和歌山県和歌山市榎原88-1 センチュリーパレス 泰苑301

(74)代理人 100072051
弁理士 杉村 興作

審査官 小野寺 麻美子

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 周波数変調格子による格子投影形状計測方法及び装置

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】 物体の高さ分布を得る形状計測方法において、
位置によって周波数と輝度が各々周期的に変化する周波数変調格子を所定の速度で移動させながら計測対象物体に投影するステップと、
前記格子が投影された計測対象物体を連続的に一定間隔で撮影するステップと、
前記撮影された画像から、周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを各々求めるステップと、
前記周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを使用して位相接続するステップと、
前記位相接続した位相分布を前記計測対象物体の高さ分

2

布に対応させるステップとを含むことを特徴とする形状計測方法。

【請求項2】 請求項1に記載の形状計測方法において、前記周波数変調格子を、前記周波数変調格子を投影した前記計測対象物体の画像における座標 (x, y) における輝度 I が、 A を周波数変化の振幅、 $\phi_1(x, y)$ を位相変化成分の初期位相、 $\phi_2(x, y)$ を周波数変化成分の初期位相、 d を格子の移動距離、 P_1 を位相変化成分の周期、 P_2 を周波数変化成分の周期とした場合、以下式(1)となるようにしたことを特徴とする、形状計測方法。

【数1】

$$I(\alpha, x, y) = a(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi}{P_1} \alpha + \theta_1(x, y) + A \cos \left(\frac{2\pi}{P_2} \alpha + \theta_2(x, y) \right) \right\} + b(x, y) \quad (1)$$

【請求項 3】 物体の高さ分布を得る形状計測装置において、位置によって周波数と輝度が各々周期的に変化する周波数変調格子の像を有する格子スライドと、前記格子スライドを所定の速度で移動させる移動手段と、前記格子スライドの格子の像を計測対象物体に投影する投影手段と、前記格子が投影された計測対象物体を連続的に一定間隔で撮影する撮影手段と、前記撮影された画像から、周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを各々求める手段と、前記周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを使用して位相接続する手段と、前記位相接続した位相分布を前記計測対象物体の高さ分布に対応させる手段とを具えることを特徴とする形状計測装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、形状計測方法及び装置に関し、特に、格子を投影した物体を撮影した画像から形状計測を行う方法及び装置に関する。

【0002】

【従来の技術】従来の形状計測法において、格子の位相解析により得られる位相分布は 0 ~ 2π の繰り返しの不連続な値となっており、位置に対し一意の値として求めるためには、分解能を落としてピッチの大きな格子を投影するか、格子の位相分布を連続化（位相接続）する必要があった。格子の位相分布を連続化することで位相値と物体の高さを 1 対 1 で対応付けることができ、位相値から物体の高さを推定することが可能になる。従来の位相接続方法は、1 種類の格子のみを用いる方法では、物体が急激な段差を持つ場合に高さを求めることができなかった。この欠点を克服するためにピッチの異なる複数の格子を用いる方法があるが、計測装置の構造が複雑になり、連続的な解析にも向かないという欠点があった。

【0003】格子の位相分布を連続化する方法として、森本吉春、瀬口靖幸、東俊彦による「フーリエ変換を用いたモアレ法によるひずみ解析」、日本機械学会論文集、54(24)、1546-1552 ページ、(1998) に記載の周囲の画素の位相値を参照する方法がある。この方法は、隣接する 2 画素の位相値を比較し、急激に変化するところを位相の変わり目と判断して連続化を行うが、ノイズの影響を受けやすく、また急激な段差のある物体では形状を計測できないという欠点を持つ。一方、ノイズの影響を受けにくく、急激な段差があっても精度よく位相接続を行う方法として、格内敏、中本邦

博、坂本亨、岩田耕一による「アクティブな液晶光源を用いた形状計測」、日本機械学会公演論文集、54(24)、1546-1552 ページ(1995) に記載のピッチの異なる複数の格子を使用する方法がある。この方法は、ピッチの異なる複数の位相分布を互いに参照しながら各画素単位で位相接続を行うため、周囲の画素の影響を受けないが、複数の格子を投影しなければならないため、装置の構造が複雑になる。本発明者は、特願平 2000-279457 号公報「カラー矩形波格子投影によるリアルタイム形状変形計測方法」において、カラーフィルムを用いて 2 種類のピッチが異なる格子を同時に投影し、撮影後に色分離することで実時間で位相接続を行う方法を開示したが、特殊なカメラが必要であり、色の濃い物体を計測しにくいという欠点があった。さらに、本発明者は、特願平 2001-315178 号公報「単色矩形波格子を用いる形状計測方法及び形状計測装置」において、2 種類のピッチが異なる矩形波を合成したグレー格子を用いて実時間で位相接続を行う方法を開示したが、最低 12 回の撮影が必要となる上に格子のコントラストが悪くなるという欠点があった。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】上述したことを鑑み、本発明の目的は、シンプルな構造の装置で位相接続を行うことができる形状計測方法及び装置を提供することである。

【0005】

【課題を解決するための手段】請求項 1 に記載の第 1 発明は、物体の高さ分布を得る形状計測方法において、位置によって周波数と輝度が各々周期的に変化する周波数変調格子を所定の速度で移動させながら計測対象物体に投影するステップと、前記格子が投影された計測対象物体を連続的に一定間隔で撮影するステップと、前記撮影された画像から、周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを各々求めるステップと、前記周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを使用して位相接続するステップと、前記位相接続した位相分布を前記計測対象物体の高さ分布に対応させるステップとを含むことを特徴とする。

【0006】

請求項 2 に記載の第 2 発明は、第 1 発明の形状計測方法において、前記周波数変調格子を、前記周波数変調格子を投影した前記計測対象物体の画像における座標 (x, y) における輝度 I が、A を周波数変化の振幅、φ₁(x, y) を位相変化成分の初期位相、φ₂(x, y) を周波数変化成分の初期位相、Δx を格子の移動距離、P₁ を位相変化成分の周期、P₂ を周波数変化成分の周期とした場合、以下式 (1) となるようにしたことを特徴とする。

【数2】

$$I(\alpha, x, y) = a(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi}{P_1} \alpha + \theta_1(x, y) + A \cos \left(\frac{2\pi}{P_2} \alpha + \theta_2(x, y) \right) \right\} + b(x, y) \quad (1)$$

【0007】請求項3に記載の第3発明は、物体の高さ分布を得る形状計測装置において、位置によって周波数と輝度が各々周期的に変化する周波数変調格子の像を有する格子スライドと、前記格子スライドを所定の速度で移動させる移動手段と、前記格子スライドの格子の像を計測対象物体に投影する投影手段と、前記格子が投影された計測対象物体を連続的に一定間隔で撮影する撮影手段と、前記撮影された画像から、周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを各々求める手段と、前記周波数に関する位相分布と、輝度に関する位相分布とを使用して位相接続する手段と、前記位相接続した位相分布を前記計測対象物体の高さ分布に対応させる手段とを具えることを特徴とする。

【0008】

【発明の効果】第1発明によれば、位置によってピッチが周期的に変化する格子模様（以後、周波数変調格子と呼ぶ）を物体に投影し、表面の形状を非接触、高速、高精度に計測する。周波数変調格子には、単色の格子に輝度変化成分と周波数変化成分の2種類の成分が組み込まれている。これら2種類の成分の位相分布を解析して、位相接続を行うことで、大きな段差や不連続な形状を持つ物体に対しても精度よく形状を計測できる。また、1種類の格子を一定間隔ずつシフトさせて投影するため、簡単な構造の装置で実現できる。

【0009】第2発明によれば、式(1)が成り立つようにすることで、輝度変化成分と周波数変化成分の2種類の成分を組み込んだ周波数変調波格子を実現すること*

$$I(\alpha, x, y) = a(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi}{P_1} \alpha + \theta_1(x, y) + A \cos \left(\frac{2\pi}{P_2} \alpha + \theta_2(x, y) \right) \right\} + b(x, y) \quad (1)$$

式(1)において、 α は格子の移動距離を表す。また、 $\theta_1(x, y)$ は位相変化成分の初期位相、 $\theta_2(x, y)$ は周波数変化成分の初期位相であり、Aは周波数変化の振幅を表す。P₁、P₂はそれぞれ位相変化成分及び周波数変化成分の周期であり、本実施例の場合、P₁ : P₂ = 3 : 3n + 1 (nは自然数)を満たすよう

*ができる。

【0010】

【発明の実施の形態】図1は、本発明による形状計測方法を実行する一般的な構成を示す図である。この例では、物体10の形状を計測する。周波数変調格子が印刷された基準格子スライド1は、移動テーブル2に取り付けられ、移動テーブル2は、ステッピングモータ3によって、コントローラ6の制御の下でx軸方向に微小に動かせるようにしてある。基準格子スライド1の前面には投影レンズ5、背面には光源4を配置し、計測対象物体10に格子が投影されるようにしてある。光源4は計測対象物体10のほうを向いており、投影レンズ5と基準格子スライド1の面が平行になるようにしてある。CCDカメラ8は、格子を投影された計測対象物体を撮影し、撮影した格子画像を位相計算用コンピュータ7に供給する。位相計算用コンピュータ7は、コントローラ6に指示して基準格子スライド1を動かしながらCCDカメラ8が撮影した格子画像から、以下に説明するような方法によって位相差分布出力画像を得て、ディスプレイ装置9に供給する。ディスプレイ装置9は、前記位相差分布出力画像を表示する。

【0011】以下に、上記構成を用いる本発明による形状計測方法を説明する。CCDカメラ8の1画素(x, y)で撮影される周波数変調格子の輝度Iは、以下の式で表される。

【数3】

にする。a及びbは、それぞれ輝度振幅(コントラスト)成分及びバイアス成分を表す。下線部分は周波数変化成分を示す。 α をP₂/3ずつ変化させて9回撮影したときの輝度IをI₀...I₈とすると、

【数4】

10
20
30
40

$$\begin{aligned}
I_0 &= a \cos\{\theta_1 + A \cos\theta_2\} + b \\
I_1 &= a \cos\left\{2\pi \frac{P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_2 &= a \cos\left\{2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_3 &= a \cos\left\{2\pi \frac{3P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\theta_2\right\} + b \\
I_4 &= a \cos\left\{2\pi \frac{4P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_5 &= a \cos\left\{2\pi \frac{5P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_6 &= a \cos\left\{2\pi \frac{6P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\theta_2\right\} + b \\
I_7 &= a \cos\left\{2\pi \frac{7P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_8 &= a \cos\left\{2\pi \frac{8P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b
\end{aligned} \tag{2}$$

となる。 $P_1 : P_2 = 3 : 2$ としたときに得られる $I_0 \sim I_8$ の画像をそれぞれ図 2 (a) ~ (i) に示す。 【数 5】
 ここで、 $P_1 : P_2 = 3 : 3n + 1$ より、次式が成り立 *

$$2\pi \frac{P_2}{P_1} = 2\pi \frac{3n+1}{3} = 2\pi n + \frac{2\pi}{3} \tag{3}$$

したがって、式 (2) の $I_0 \sim I_8$ を次のように書き直すことができる。 【数 6】

$$\begin{aligned}
I_0 &= a \cos\{\theta_1 + A \cos\theta_2\} + b \\
I_1 &= a \cos\left\{2\pi \frac{P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_2 &= a \cos\left\{2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_3 &= a \cos\left\{2\pi \frac{P_2}{P_1} + \theta_1 + A \cos\theta_2\right\} + b = a \cos\left\{\frac{2\pi}{3} + \theta_1 + A \cos\theta_2\right\} + b \\
I_4 &= a \cos\left\{2\pi \left(\frac{P_2}{P_1} + \frac{P_2}{3P_1}\right) + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b = a \cos\left\{\frac{2\pi}{3} + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_5 &= a \cos\left\{2\pi \left(\frac{P_2}{P_1} + \frac{2P_2}{3P_1}\right) + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b = a \cos\left\{\frac{2\pi}{3} + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_6 &= a \cos\left\{2\pi \frac{2P_2}{P_1} + \theta_1 + A \cos\theta_2\right\} + b = a \cos\left\{\frac{4\pi}{3} + \theta_1 + A \cos\theta_2\right\} + b \\
I_7 &= a \cos\left\{2\pi \left(\frac{2P_2}{P_1} + \frac{P_2}{3P_1}\right) + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b = a \cos\left\{\frac{4\pi}{3} + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b \\
I_8 &= a \cos\left\{2\pi \left(\frac{2P_2}{P_1} + \frac{2P_2}{3P_1}\right) + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b = a \cos\left\{\frac{4\pi}{3} + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + \theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right)\right\} + b
\end{aligned} \tag{4}$$

輝度 I_0 、 I_3 、 I_6 に注目すると、これらは周波数変化成分が同じであり、それぞれの位相変化成分が $2\pi/3$ ずつ異なっていることがわかる。したがって、位相シフト法の適用により、周波数変化成分を含む格子の初期

位相を求めることができる。この周波数変化成分を含む初期位相を θ_0 と定義すると、 θ_0 は以下の式で表される。

$$\theta_0 + A \cos\theta_2 = \arg\{2I_0 - I_3 - I_6, \sqrt{3}(I_6 - I_3)\} = \theta_0 \tag{5}$$

ただし、式 (5) において、 \arg は位相算出の演算子であり、定義を以下の表に示す。 $\arg(x, y)$ の定義 【表 1】

	$x < 0$	$x = 0$	$x > 0$
$y > 0$	$\pi + \tan^{-1}(y/x)$	$\pi/2$	$\tan^{-1}(y/x)$
$y = 0$	π	値なし	0
$y < 0$	$\pi + \tan^{-1}(y/x)$	$3\pi/2$	$2\pi + \tan^{-1}(y/x)$

I₁、I₄、I₇ 及び I₂、I₅、I₈ から同様のこ * する。

とがいえ、以下の式で示すように θ₁、θ₂ を定義す * 【数 8】

$$\theta_1 + A \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right) + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} = \arg\{2I_1 - I_4 - I_7, \sqrt{3}(I_7 - I_4)\} = \theta_1 \quad (6)$$

【数 9】

$$\theta_1 + A \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right) + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} = \arg\{2I_2 - I_5 - I_8, \sqrt{3}(I_8 - I_5)\} = \theta_2 \quad (7)$$

このようにして得られる θ₀、θ₁、θ₂ の画像を、そ 10 ように求めることができる。

それぞれ図 3 a、3 b、3 c に示す。さらに、式 (5) ~ 【数 10】

(7) を用いて、周波数変化成分の初期位相 θ₂ を次の

$$\theta_2 = \arg\left\{2\theta_0 - \theta_1 - \theta_2 + 2\pi \frac{P_2}{P_1}, \sqrt{3}\left(\theta_2 - \theta_1 - 2\pi \frac{P_2}{3P_1}\right)\right\} \quad (8)$$

式 (8) より周波数変化成分の初期位相 θ₂ が求められ 求めることができる。
ることから、以下の式により位相変化成分の位相 θ₁ を

$$\theta_1 = \theta_0 - A \cos \theta_2 \quad (9)$$

最後に、式 (8) 及び (9) で求めた 2 種類の初期位相 θ₁ 及び θ₂ を用いて位相接続を行うことによって、分解能の高い位相分布を各画素ごとに得ることができる。初期位相 θ₁、θ₂ 及び連続化後の初期位相の分布をそれぞれ図 3 d、3 e、3 f に示す。

【0012】2種類の位相分布を用いた位相接続法を説明する。上記で求めた2種類の初期位相 θ₁、θ₂ は、共に 0 ~ 2π の繰り返しの不連続な値となっており、位置に対して一意の値を求めるためには、位相分布を連続

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_1 + 2\pi k_1 \\ \theta_2 &= \theta_2 + 2\pi k_2 \end{aligned} \quad (10)$$

また、θ₁ と θ₂ は、以下の2式に示す関係となる。

$$\theta_1 - n\theta_2 = \theta_1 - \text{Mod}(n\theta_2, 2\pi) + 2\pi(k_1 - nk_2) \quad (11)$$

【数 11】

$$\theta_2 = \frac{P_1}{nP_2} \theta_1 \quad (12)$$

ここで、Mod(θ, 2π) は、θ を 2π で割った余りを表し、Mod(θ, 2π) = θ - 2π [θ / 2π] と定義する。([] はガウス記号を示す)。また、P₁ : P₂ = 3 : 3n + 1 なので、n = [P₂ / P₁] である。図 4 に、位相分布 θ₁、θ₂ 及び θ₁、Mod(θ₂, 2π) の関係を示す。図 4 より、θ₁ と Mo

d(nθ₂, 2π) の大小関係は位置 x によって変化するため、式 (11)、(12) に示す関係から、0 ≤ θ₁ < 6π P₂ / P₁ の範囲では、次式によって θ₁ を求めることができる。

【数 12】

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{nP_2}{nP_2 - P_1} (\theta_1 - \text{Mod}(n\theta_2, 2\pi)) \quad (\theta_1 \geq \text{Mod}(n\theta_2, 2\pi) \text{ の場合}) \\ \theta_1 &= \frac{nP_2}{nP_2 - P_1} (\theta_1 - \text{Mod}(n\theta_2, 2\pi) + 2\pi) \quad (\theta_1 < \text{Mod}(n\theta_2, 2\pi) \text{ の場合}) \end{aligned} \quad (13)$$

【0013】専用ハードウェアによる実時間化を説明する。図 5 は、本発明による形状計測方法を高速に行うためのハードウェアの構成を示す図である。基準格子スライド 11、移動テーブル 12、ステッピングモータ 13、投影レンズ 15、CCD カメラ 18、ディスプレイ

装置 19、計測対象物体 20 は、図 1 における、基準格子スライド 1、移動テーブル 2、ステッピングモータ 3、投影レンズ 5、CCD カメラ 8、ディスプレイ装置 9、計測対象物体 10 と同様である。タイミングコントローラ 16 は、基準格子スライドの移動速度を、CCD

カメラ 1 8 のフレームレートごとに $P_2 / 3$ ずつ移動するように調節し、CCDカメラ 1 8 による撮影と同期してストロボ光源 1 4 を発光させる。このようにして、格子の移動によるぶれのない画像を撮影できる。

【0014】図 6 は、周波数変調格子位相解析回路 1 7 の構成を示すブロック図である。CCDカメラ 1 8 から入力された格子画像は、A/D変換部 2 1 で A/D変換されてから、タイミングコントローラ 1 6 からのフレーム同期信号に応じて、切り替え器 2 2 によって、フレームメモリ $I_0 \sim I_9$ に順次格納される。これらの画像を * 10

$$\arg\{2I_n - I_{n+1} - I_{n-1}, \sqrt{3}(I_{n+1} - I_{n-1})\} = \theta_n$$

I_n, I_{n+1}, I_{n-1} : 入力
 θ_n : 出力

入力のすべての組み合わせに対して式 (1 3) を予め計算しておく。また、3次元位相接続テーブル T_2 は、テーブル T_2 を用いて得られた $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ を入力とし、連続化後の位相分布 θ_1 を出力とする。位相差画像を表示する方法を述べる。本方法では、基準面上の位相分布との差を計算することによって物体の高さ分布が得られる。まず、スイッチ S を入れて、基準面上の位相分布 θ_0 をフレームメモリ 2 3 に格納する。次に、スイッチ S を切り、測定対象物体 2 0 を撮影することで、位相差分布画像を実時間で出力することができる。

【0015】本発明による形状計測方法が正しく動作することは、上述した、シミュレーションによって確認した画像とその分布を表すグラフである図 2 及び 3 から明らかである。図 2 は、 $P_1 : P_2 = 3 : 2$ としたときの物体に投影した周波数変調格子の画像であり、a ~ i は、それぞれ、 $\theta_0, P_2 / 3, 2 P_2 / 3, P_2, 4 P_2 / 3, 5 P_2 / 3, 2 P_2, 7 P_2 / 3, 8 P_2 / 3$ のときの画像である。また、図 3 a、3 b、3 c は、それぞれ、周波数変化成分を含む位相分布 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ である。図 3 d 及び 3 e は、これらから求められる 2 種類の位相分布 θ_1, θ_2 である。図 3 f は、位相分布 θ_1, θ_2 を用いて求めた連続化後の位相分布である。これらの画像から、周波数変調格子に含まれる 2 種類の位相分布を解析し、これらから位相接続ができていくことがわかる。

【0016】図 7 は、実際の物体に周波数変調格子を投影し、物体の形状計測を行った結果である。図 7 a は、石膏像に周波数変調格子を投影した結果である。図 7 b、7 c、7 d は、それぞれ、2 種類の位相分布 θ_1, θ_2 及び連続化後の位相分布 θ_1 である。図 7 e は、予め同じ方法によって得ていた基準面 (平板) の位相分布 θ_1' (連続化後) である。図 7 f は、図 7 d の画像及

* 3 つおきにとって 3 次元位相算出テーブル T_1 を通すことで、周波数変化を含む初期位相 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ が即座に得られる。さらにこれらを 3 次元位相接続テーブル T_2 を通すことで、連続化後の初期位相 θ_1 も即座に得られる。1 フレームの画像が入力されるたびにフレームメモリ $I_0 \sim I_9$ の 1 つが更新されるため、テーブルから出力される位相画像も 1 フレームごとに更新される。3 次元位相テーブル T_1 の入力と出力の関係を以下の式に示す。

【数 1 0】
 $(n=0,1,2)$
(13)

び図 7 e の画像から求めた位相差分布である。この画像より、位相の折り返しが無い物体の高さ分布が得られていることがわかる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明による形状計測方法を実行する一般的な構成を示す図である。

20 【図 2】 a ~ i は、シミュレーションによる平面に投影した周波数変調格子の画像である。

【図 3】 シミュレーションによる平面に投影した周波数変調格子の位相分布であり、a、b、c は周波数変調格子の位相分布であり、d は周波数変化成分を除いた位相分布であり、e は周波数変化成分の初期位相であり、f は連続化後の位相分布である。

【図 4】 位相接続前後の位相分布を示すグラフである。

30 【図 5】 本発明による形状計測方法を高速に行うためのハードウェアの構成を示す図である。

【図 6】 図 5 における周波数変調格子位相解析回路の構成を示すブロック図である。

【図 7 a】 石膏像に周波数変調格子を投影した画像であり、物体の形状計測を行った結果である。

【図 7 b】 2 種類の位相分布を示す図であり、物体の形状計測を行った結果である。

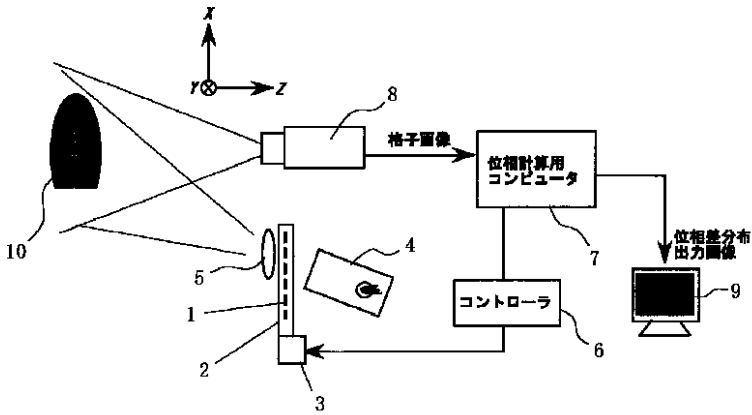
【図 7 c】 2 種類の位相分布を示す図であり、物体の形状計測を行った結果である。

40 【図 7 d】 連続化後の位相分布を示す図であり、物体の形状計測を行った結果である。

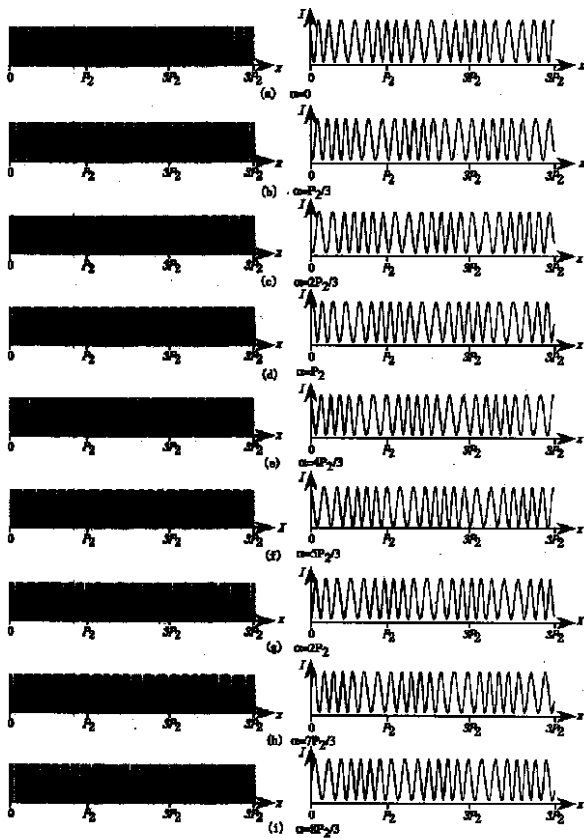
【図 7 e】 基準面の連続化後の位相分布を示す図であり、物体の形状計測を行った結果である。

【図 7 f】 結果として得られた位相差分布を示す図である。

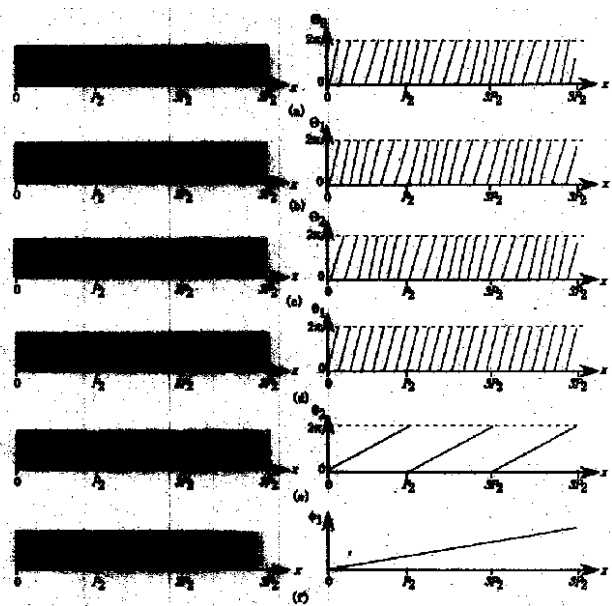
【図1】



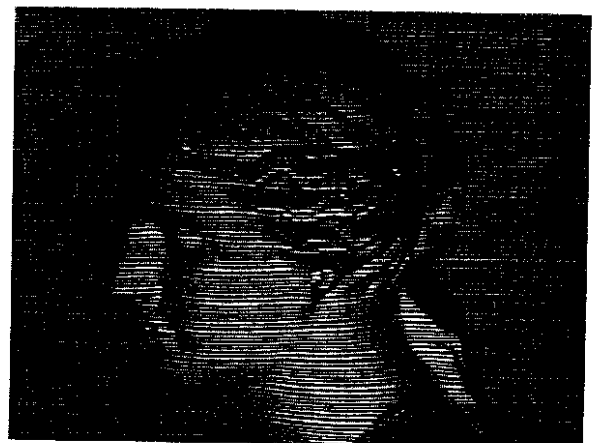
【図2】



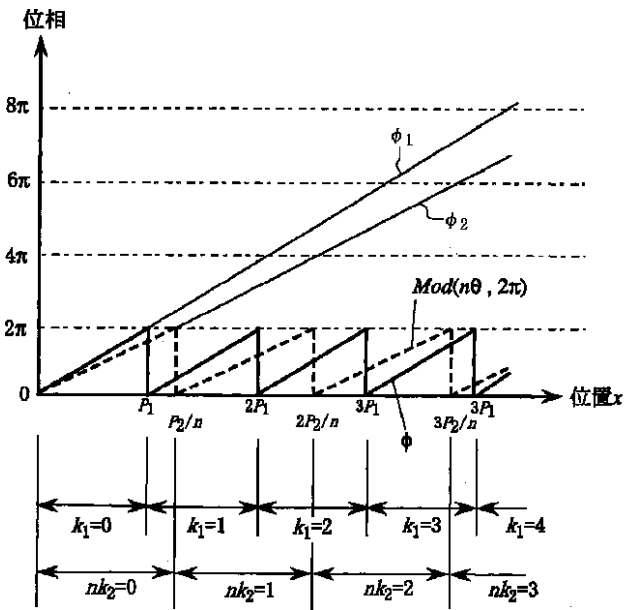
【図3】



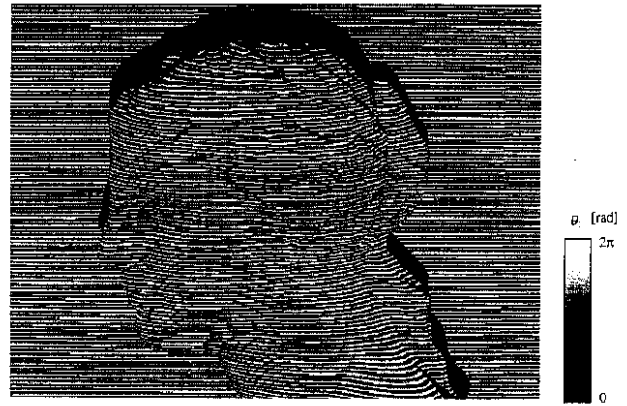
【図7 a】



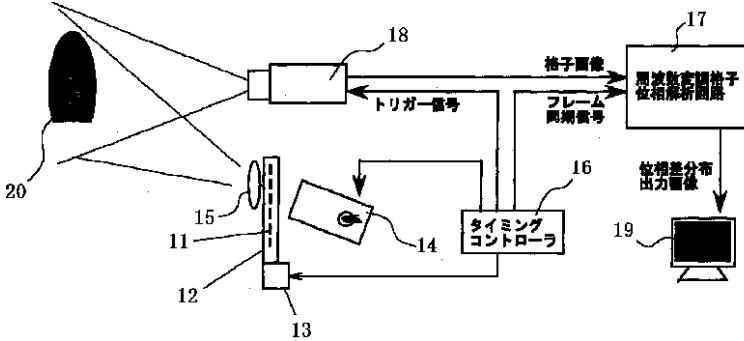
【図4】



【図7b】



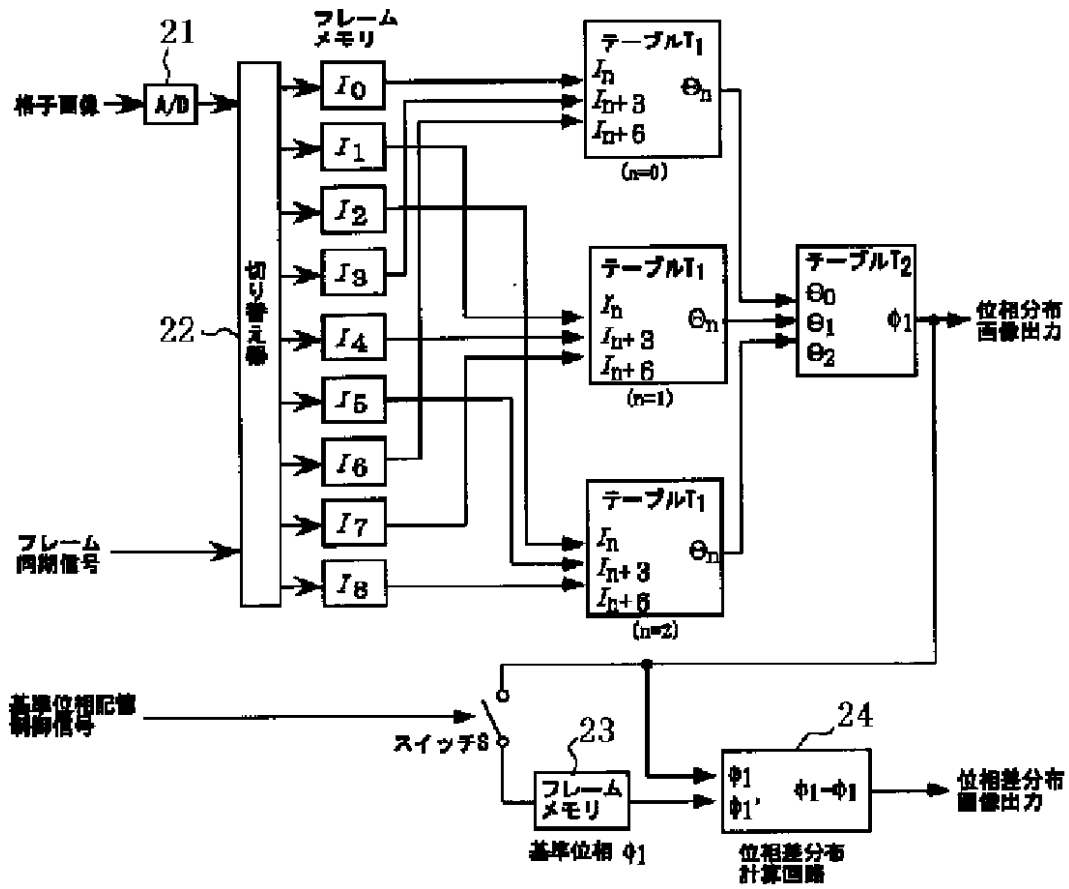
【図5】



【図7c】



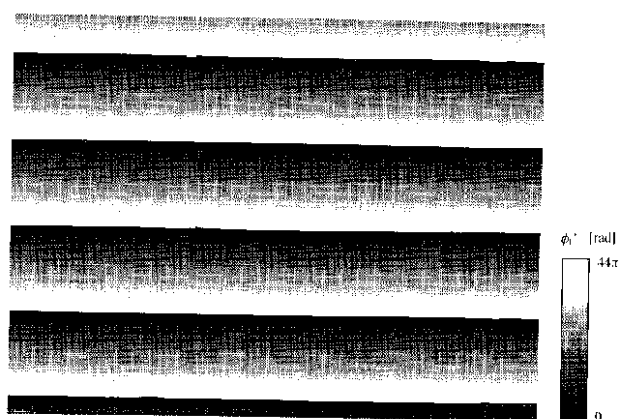
【図6】



【図7d】



【図7e】



【図7f】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2003 - 83730 (J P , A)
特開2000 - 105109 (J P , A)
特開 平11 - 257930 (J P , A)
特開 平10 - 122834 (J P , A)
特開2003 - 121124 (J P , A)
特開2002 - 90126 (J P , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl.⁷, D B名)
G01B 11/24
G01B 11/25