

(19)日本国特許庁 ( J P )

# (12)特許公報 ( B 2 )

(11)特許番号

## 特許第3500430号

( P 3 5 0 0 4 3 0 )

(45)発行日 平成16年2月23日(2004.2.23)

(24)登録日 平成15年12月12日(2003.12.12)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

G01B 11/25

G01B 11/24

E

請求項の数 4 (全7頁)

(21)出願番号 特願2001 - 315178( P 2001 - 315178)

(73)特許権者 396019376

和歌山大学長

和歌山県和歌山市栄谷930

(22)出願日 平成13年10月12日(2001.10.12)

(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

(65)公開番号 特開2003 - 121124( P 2003 - 121124 A )

(43)公開日 平成15年4月23日(2003.4.23)

(72)発明者 藤垣 元治

和歌山県和歌山市木ノ本694 - 1

審査請求日 平成13年10月12日(2001.10.12)

(72)発明者 米山 聡

和歌山県和歌山市榎原88 - 1

(72)発明者 岩井 一能

和歌山県和歌山市栄谷495 - 4

(74)代理人 100072051

弁理士 杉村 興作

審査官 岡田 卓弥

最終頁に続く

(54)【発明の名称】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

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測定方法において、

各々の白黒比が異なり、互いのピッチ比が、 $m$ と $n$ を3以上の互いに素である整数として、 $m : n$ である2つの異なる矩形波成分を合成した単色矩形波格子を物体に投影するステップと、

この単色矩形波格子全体の周期の $1 / (m \times n)$ ずつずらして $m \times n$ 枚の画像を撮影するステップと、

前記 $m \times n$ 枚の画像のうち $m$ 枚おきに抜き出した $n$ 枚の画像から周期が $m / (m \times n)$ の矩形波成分に関する位相分布を求め、 $n$ 枚おきに抜き出した $m$ 枚の画像から周期が $m / (m \times n)$ の矩形波成分に関する位相分布を求めるステップと、

前記双方の矩形波成分に関する位相分布から前記物体の

2

高さ分布に対応する連続化された位相分布を得るステップとを含むことを特徴とする形状測定方法。

【請求項2】 請求項1に記載の形状測定方法において、前記画像を、撮影時間中の光の強度の積分値を輝度として撮影した画像とし、各々の矩形波成分に関する位相分布を得るステップにおいて、積分型位相シフト法を用いることを特徴とする形状測定方法。

【請求項3】 物体の高さ分布を得る形状測定装置において、

10 各々の白黒比が異なり、互いのピッチ比が、 $m$ と $n$ を3以上の互いに素である整数として、 $m : n$ である2つの異なる矩形波成分を合成した単色矩形波格子と、前記単色矩形波格子を物体に投影する投影手段と、前記単色矩形波格子を移動する格子移動手段と、前記物体を撮影する撮影手段とを具え、

前記格子移動手段を、前記撮影手段の撮影周期において、前記単色矩形波格子をこの単色矩形波格子全体の周期の  $1 / (m \times n)$  だけ移動するように構成し、前記撮影手段が前記格子移動手段によって前記単色矩形波格子を移動しながら前記撮影手段によって連続して  $m \times n$  枚の画像を撮影し、該装置が、

前記  $m \times n$  枚の画像のうち  $m$  枚おきに抜き出した  $n$  枚の画像から周期が  $m / (m \times n)$  の矩形波成分に関する位相分布を求め、 $n$  枚おきに抜き出した  $m$  枚の画像から周期が  $m / (m \times n)$  の矩形波成分に関する位相分布を求める手段と、

前記双方の矩形波成分に関する位相分布から前記物体の高さ分布に対応する連続化された位相分布を得る手段とをさらに具えることを特徴とする形状測定装置。

【請求項 4】 請求項 3 に記載の形状測定装置において、前記撮影手段が、撮影時間中の光の強度の積分値を輝度として撮影し、前記矩形波成分の位相分布を求める手段が、積分型位相シフト法を用いて位相分布を求めることを特徴とする形状測定装置。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】本発明は、計測装置、形状計測、監視装置の分野に関し、特に、非接触で物体の等高線の位相分布を得る形状計測方法に関する。本発明はさらにこのような方法を行う形状計測装置にも関する。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】物体の形状を非接触で計測する方法としては、物体に投影された格子のゆがみを解析する方法がよく用いられている。物体に等ピッチの格子を投影し、投影方向とは異なった方向から撮影すると、前記物体の形状に応じてゆがんだ格子画像が得られる。既知であるモアレトポグラフィの手法を用いれば、このゆがんだ格子画像から簡単な画像処理によって前記物体の等高線画像を得ることができる。この等高線の位相値は前記物体の高さを表す値であるため、等高線の位相分布をリアルタイムで求めることにより、リアルタイム形状計測を実現することができる。

【 0 0 0 3 】本願人は、特願平 1 1 - 1 7 9 9 5 0 号明細書において、明暗比 1 : 1 の矩形波状の格子を連続的に位相シフトしながら撮影した画像から位相分布を求めることができる積分型位相シフト法を開示している。投影格子に矩形波を用いることにより、物体の反射率の影響や、投影・撮影装置における輝度変換の非線形性の影響を受けにくくなる。また、連続的に位相シフトするため、撮影するたびに格子の移動を停止させる従来の方法と比較して、位相シフト機構とその制御が単純で、高速化も簡単に行うことができる。この方法によれば、明暗比が 1 : 1 の矩形波状格子を用い、過去の 4 フレームの画像から、各フレーム時間ごとに物体の高さ分布を表す位相差分布を表示することができる。

【 0 0 0 4 】さらに本願人は、特願 2 0 0 0 - 2 7 9 4 5 7 号明細書において、カラー矩形波格子を用いてリアルタイムに位相解析を行う方法を開示している。この方法によれば、ピッチ及び色が異なる 2 種類の格子を用い、連続的に位相シフトを行うことにより、格子を撮影する CCD カメラの各フレーム時間ごとに物体の高さ分布を表す位相差分布を表示することができる。

【 0 0 0 5 】また、本願人は、特願 2 0 0 1 - 1 9 5 0 3 2 号明細書において、干渉縞の 2 成分分離型位相シフト手法を開示している。この手法によれば、2 種類のピッチが異なる正弦波状の格子を合成し、位相シフトを行うことにより、各格子の位相分布を求めることができる。

【 0 0 0 6 】

【発明が解決しようとする課題】上記特願 2 0 0 0 - 2 7 9 4 5 7 号明細書に記載の方法においては、2 種類の矩形波の色分離を行うための特殊なフィルタと CCD カメラが必要になるという欠点があった。また、完全に色分離を行うのが困難であるという欠点があった。

20 【 0 0 0 7 】上記特願 2 0 0 1 - 1 9 5 0 3 2 号明細書に記載の方法においては、フィルムで格子を作成する場合、精度の良い正弦波格子を作ることは困難であるという欠点があった。

【 0 0 0 8 】上述したことを鑑み、本発明は、従来の方法における欠点を解消した形状測定方法を提供することを目的とする。さらに本発明は、このような方法を実行する装置を提供することも目的とする。

【 0 0 0 9 】

30 【課題を解決するための手段】本発明の請求項 1 に記載の第 1 発明による形状測定方法は、各々の白黒比が異なり、互いのピッチ比が、 $m$  と  $n$  を 3 以上の互いに素である整数として、 $m : n$  である 2 つの異なる矩形波成分を合成した単色矩形波格子を物体に投影するステップと、この単色矩形波格子全体の周期の  $1 / (m \times n)$  ずつずらして  $m \times n$  枚の画像を撮影するステップと、前記  $m \times n$  枚の画像のうち  $m$  枚おきに抜き出した  $n$  枚の画像から周期が  $m / (m \times n)$  の矩形波成分に関する位相分布を求め、 $n$  枚おきに抜き出した  $m$  枚の画像から周期が  $m / (m \times n)$  の矩形波成分に関する位相分布を求めるステップと、前記双方の矩形波成分に関する位相分布から前記物体の高さ分布に対応する連続化された位相分布を得るステップとを含むことを特徴とする。

40 【 0 0 1 0 】本発明の請求項 2 に記載の第 2 発明による形状測定方法は、前記第 1 発明の形状測定方法において、前記画像を、撮影時間中の光の強度の積分値を輝度として撮影した画像とし、各々の矩形波成分に関する位相分布を得るステップにおいて、積分型位相シフト法を用いることを特徴とする。

50 【 0 0 1 1 】本発明の請求項 3 に記載の第 3 発明による形状測定装置は、各々の白黒比が異なり、互いのピッチ

比が、 $m$ と $n$ を3以上の互いに素である整数として、 $m : n$ である2つの異なる矩形波成分を合成した単色矩形波格子と、前記単色矩形波格子を物体に投影する投影手段と、前記単色矩形波格子を移動する格子移動手段と、前記物体を撮影する撮影手段とを具え、前記格子移動手段を、前記撮影手段の撮影周期において、前記単色矩形波格子をこの単色矩形波格子全体の周期の $1 / (m \times n)$ だけ移動するように構成し、前記撮影手段が前記格子移動手段によって前記単色矩形波格子を移動しながら前記撮影手段によって連続して $m \times n$ 枚の画像を撮影し、該装置が、前記 $m \times n$ 枚の画像のうち $m$ 枚おきに抜き出した $n$ 枚の画像から周期が $m / (m \times n)$ の矩形波成分に関する位相分布を求め、 $n$ 枚おきに抜き出した $m$ 枚の画像から周期が $m / (m \times n)$ の矩形波成分に関する位相分布を求める手段と、前記双方の矩形波成分に関する位相分布から前記物体の高さ分布に対応する連続化された位相分布を得る手段とをさらに具えることを特徴とする。

【0012】本発明の請求項4に記載の第4発明による形状測定装置は、前記第3発明による形状測定装置において、前記撮影手段が、撮影時間中の光の強度の積分値を輝度として撮影し、前記矩形波成分の位相分布を求める手段が、積分型位相シフト法を用いて位相分布を求めることを特徴とする。

【0013】

【発明の効果】第1発明の方法及び第3発明の装置によれば、従来方法及び装置より高分解能、または高さ方向に広範囲に形状計測を行うことが可能となる。従来(上記で引用した特願2000-279457号明細書)の方法ではカラー格子を用いていたが、本発明による方法及び装置では単色格子を用いているため、通常のCCDカメラで解析することができる。また、色分離を行う必要がないため、特殊な手段や装置を必要とせず、位相接続を行うことができるため、従来方法及び装置より高分解能に形状計測を行うことが可能となるといった利点がある。過去に撮影された $m \times n$ 枚の画像から各矩形波成分の位相値をそれぞれ求めることができるため、1フレーム撮影毎に結果が得られるといった利点もある。

【0014】第2発明の方法及び第4発明の装置は、CCDカメラのような撮影時間中の光の強度の積分値を輝度として撮影する撮影装置を想定しており、積分型位相

$$I_c(t) = I_a(t) + I_b(t) + I_{b.a.c.k}(t) \quad (1)$$

CCDカメラは、1フレームの撮影時間中の光の強度の積分値を輝度として撮影する。したがって、この合成矩形波格子を1フレームで $1 / 12$ 周期づつ変化するよう

$$I_{cn} = \int_{(n-1)T}^{nT} I_c(t) dt \quad (2)$$

ここで、 $n$ は位相シフト回数を、 $T$ はカメラの1フレームの撮影時間を表している。

シフト法を用いているため、高速度カメラへの適用が可能となる。

【0015】

【発明の実施の形態】図1は、本発明による形状計測方法を行う装置の構成の一例を示す線図である。測定対象である物体1に、格子投影プロジェクタ2によって格子を投影し、物体1に投影された格子をCCDカメラ3によって撮影する。格子投影プロジェクタ2は、単色矩形波格子4と、格子移動機構5と、光源6と、レンズ7を含む。光源6から放射された光は、格子移動機構5によって移動される単色矩形波格子4を通過し、レンズ7によって物体1の表面に合焦される。このような構成によって撮影された画像を、例えば、CCDカメラ3に接続されたコンピュータのような解析手段(図示せず)によって、後述するような積分型位相シフト方法や位相接続方法によって解析し、物体1の高さ分布を得る。

【0016】図2は、図1に示す単色矩形波格子4の一例を示す図である。図2a及び2bは、それぞれ白黒比1:1、1:2の矩形波格子成分を示す。これら白黒比1:1及び1:2の格子成分間のピッチの比は、4:3となっている。図2cは、これら2種類の矩形波格子成分を組み合わせた単色矩形波格子を示し、この単色矩形波格子を本発明による形状計測方法において用いる。

【0017】本発明による形状計測方法の一実施形態では、図2cに示すような単色矩形波格子4を、格子移動機構5によって、CCDカメラ3のフレームレート(通常1/30秒)毎に、 $1 / 12$ 周期変化するように等速で連続的にシフトさせる。このようにして撮影された連続する12枚の画像から、積分型位相シフト法を用いて各々の矩形波成分に関する位相分布画像を求める。以下に位相分布画像の求め方を示す。

【0018】図3は、CCDカメラのある1画素における投影格子の光の強度変化を示す図である。図3a及び3bは、それぞれ白黒比1:1、1:2の格子成分、すなわち、図2a及び2bに示すような格子に関する強度変化を示す。ここで $I_a$ は1:1格子成分の強度、 $I_b$ は1:2格子成分の強度を表している。図3は、合成された矩形波、すなわち図2cに示すような本発明による形状測定方法に用いる単色矩形波格子に関する強度変化 $I_c$ を示す。このとき背景の光の強度 $I_{b.a.c.k}$ も考慮して $I_c$ を時間 $t$ の関数として表せば、以下の式(1)のようになる。

$$I_c(t) = I_a(t) + I_b(t) + I_{b.a.c.k}(t) \quad (1)$$

に連続的に位相シフトした時にCCDカメラで得られる輝度 $I_{cn}$ は以下の式(2)のように表される。

$$I_{cn} = \int_{(n-1)T}^{nT} I_c(t) dt \quad (2)$$

【0019】図4は、図2cの単色矩形波格子を $1 / 12$ ピッチずつ連続的に等速で位相シフトさせながら撮影

すると得られる 1 2 枚の画像である。この図の横方向は位置を表している。撮影された格子の輝度分布は、例として 1 フレーム目の画像に関して、その上に示すような形となる。

【 0 0 2 0 】 図 5 は、図 2 のそれぞれの格子を 1 / 1 2 周期毎に等速で位相シフトして撮影された際の光の強度の積分値の変化を示している。図中の点線は、図 4 に示した位置に対する輝度変化と同じ値を示している。これは実際には撮影できる値ではないが、説明を容易にするため便宜上示している。CCDカメラで撮影される輝度は、t が T の整数倍となる時刻でのみ得られ、この時刻での点線上の値となる。( a ) 及び ( b ) における点線は、( c ) の点線で表した便宜上の輝度変化の 1 : 1 格子成分と 1 : 2 格子成分をそれぞれ表している。そのため、( a ) 及び ( b ) においても、これらの点線上で t が T の整数倍の位置に各成分は現れることになる。

【 0 0 2 1 】 ところで、白黒比 1 : 1 の矩形波の位相は、積分型位相シフト法を用いて、連続する 4 フレームの輝度値から計算することができる。同じく白黒比 1 : 2 の矩形波の位相は、連続する 3 フレームの輝度値から計算することができる。この位相値の求め方は、1 : 1 の矩形波については上記で引用した特願平 1 1 - 1 7 9 9 5 0 に、1 : 2 の矩形波については特願 2 0 0 0 - 2 7 9 4 5 7 に記載されているため、詳しい説明は省略する。

【 0 0 2 2 】 図 2 に示すような格子に関しては、1 2 枚の画像を撮影し、1 : 1 の矩形波の位相は 3 枚おきに抜き出した 4 枚の画像から、1 : 2 の矩形波の位相は 4 枚おきに抜き出した 3 枚の画像からそれぞれ求めることができる。これは、1 : 1 の矩形波について説明すると、図 5 の ( a ) の黒三角印が、3 枚おきに抜き出した 4 点の輝度値である。3 枚おきに抜き出すと、図 5 の ( b ) の印に示すように 1 : 2 の矩形波の積分値が一定とな

$$c = 4 ( a_1 - a_2 )$$

$$c = 4 ( a_1 - a_2 + 2 )$$

【 0 0 2 5 】 図 4 の画像を用いて、本発明による形状計測方法における単色矩形波格子による積分型位相シフト法を用いた位相解析アルゴリズムで位相接続が実行できることを確認する。図 4 の画像から、上述したように、1 : 1 の矩形波及び 1 : 2 の矩形波に関してそれぞれ 4 枚及び 3 枚ごとに抜き出して積分型位相シフト法により位相解析を行った結果が図 7 a 及び 7 b である。この 2 種類の位相分布画像より、上記で説明したような位相接続を行った結果が図 7 c である。

【 0 0 2 6 】 図 8 は、本発明による形状測定方法により、実際の物体に単色矩形波格子を投影し、位相接続を行った結果を示す図である。図 8 a は、物体に投影した単色矩形波格子を CCD カメラで撮影したものである。連続的に位相シフトした 1 2 枚の画像から 1 : 1 の矩形

る。そのため、図 5 の ( c ) に示す黒四角印の 4 点の輝度変化は、黒三角印の輝度変化と同一となる。よって、積分型位相シフト法を用いることにより、1 : 1 の矩形波成分の位相値を得ることができる。同様に 4 枚おきに抜き出すことによって、1 : 1 の矩形波の影響は受けないものとして 1 : 2 の矩形波成分の位相値を得ることができる。この解析手法は過去 1 2 枚の画像を用いているので、新たに画像が撮影される毎に一番古い 1 枚を捨て、新しい 1 枚を加えることによって同様に位相解析を行うことができる。このようにして 1 フレーム毎に位相解析結果を得ることができる。

【 0 0 2 3 】 2 つの異なるピッチの格子を用いる位相接続方法について説明する。格子の位相値は、輝度変化の 1 周期ごとに 2 ずつ増加していく。しかし、上述したような位相解析により得られる位相値 ( および位相差 ) は、本来の位相値を 2 で割ったあまりの値となる。そのために、場所に対する位相値の変化は、0 ~ 2 の繰り返しとなり、不連続となる。位相接続 ( 位相の連続化 ) とは、位相解析によって得られた 0 ~ 2 の繰り返しの位相値に 2 n ( n は整数 ) を加えることによって、連続的な位相値を求めることである。位相接続を行う方法のひとつとして、複数のピッチの格子を用いる方法がよく用いられている。本発明による形状計測方法では、ピッチの異なる 2 種類の格子を合成した単色矩形波格子を物体上に投影し、上述したような位相解析手法を用いてそれぞれのピッチの位相値を求め、それらの値から連続化された位相分布画像を実時間で求めている。

【 0 0 2 4 】 図 6 は、1 : 1 の矩形波の位相分布  $c_1$  と、1 : 2 の矩形波の位相分布  $c_2$  と、1 : 1 の矩形波の連続化後の位相分布  $c_c$  とを示す。0  $c_c$  < 8 の範囲では、以下の式 ( 3 ) によって  $c_c$  を求めることができる。

$$\begin{aligned} & ( c_1 < c_2 \text{ の場合} ) \\ & ( c_1 < c_2 \text{ の場合} ) \end{aligned} \quad ( 3 )$$

波成分の位相分布を計算した画像を図 8 b に、1 : 2 の矩形波成分の位相分布画像を図 8 c に示す。また、あらかじめ同じ方法で求めておいた基準板 ( 平板 ) の位相分布をそれぞれ図 8 d 及び 8 e に示す。図 8 d と 8 b、図 8 e と 8 c の画像から求めた位相差分布画像を、それぞれ図 8 f 及び 8 g に示す。これらの図から、物体の高さ分布画像が得られることが分かる。ただしこれらの図の場合は位相接続を行っていないため、高さ分布を表す位相差分布画像は 0 ~ 2 の繰り返しとなっている。そこでこれら 2 つの位相差分布画像より、上述した方法により位相接続を行った結果を図 8 h に示す。

【 図面の簡単な説明 】

【 図 1 】 本発明による単色矩形波格子を用いた形状計測装置の構成を示す図である。

【 図 2 】 a は白黒比 1 : 1 の矩形波格子成分を示す図

10

20

30

40

50

と輝度と位置との関係を示すグラフであり、bは白黒比 1 : 2 の矩形波格子成分を示す図と輝度と位置との関係を示すグラフであり、cは本発明による形状計測方法で用いる単色矩形波格子を示す図と輝度と位置との関係を示すグラフである。

【図3】 CCDカメラのある1画素における単色矩形波格子と各矩形波成分の輝度変化を示すグラフである。

【図4】 シミュレーションによる単色矩形波格子の位相シフトを示す図である。

【図5】 単色矩形波格子の時間に関する積分値変化と各矩形波成分の影響とを示すグラフである。

【図6】 位相接続前後の位相分布を示すグラフである。

【図7】 シミュレーションによる位相接続結果を示す図であり、aは1 : 1矩形波成分の位相分布であり、bは1 : 2矩形波成分の位相分布であり、cは位相接続画像である。

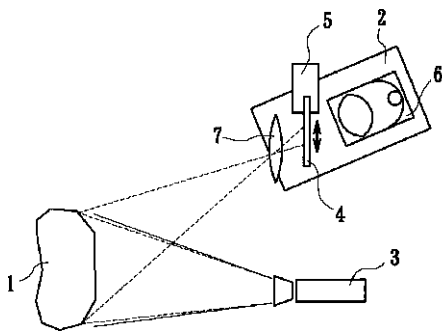
【図8】 本発明の単色矩形波格子を用いた形状計測装

置による物体の形状計測例を示す図であり、aは物体に投影した単色矩形波格子をCCDカメラで撮影した画像であり、bは1 : 1の矩形波成分の位相分布画像であり、cは1 : 2の矩形波成分の位相分布画像であり、dは1 : 1の矩形波分布の基準板における位相分布であり、eは1 : 2の矩形波成分の基準板における位相分布であり、fは1 : 1の矩形波成分の位相差分布画像であり、gは1 : 2の矩形波成分の位相差分布画像であり、hは位相接続を行った結果の画像である。

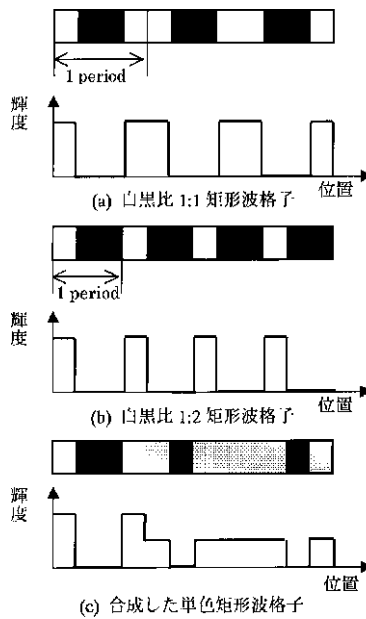
【符号の説明】

- 1 物体
- 2 格子投影プロジェクタ
- 3 CCDカメラ
- 4 単色矩形波格子
- 5 格子移動機構
- 6 光源
- 7 レンズ

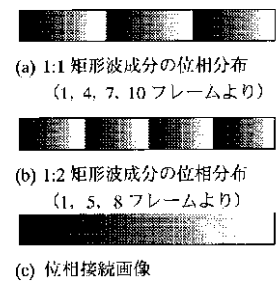
【図1】



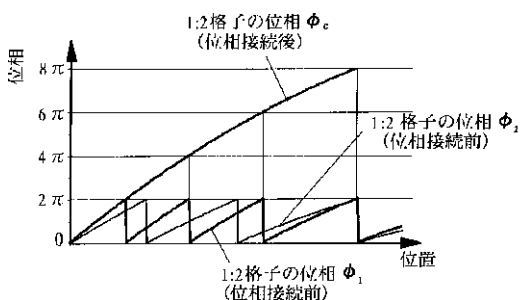
【図2】



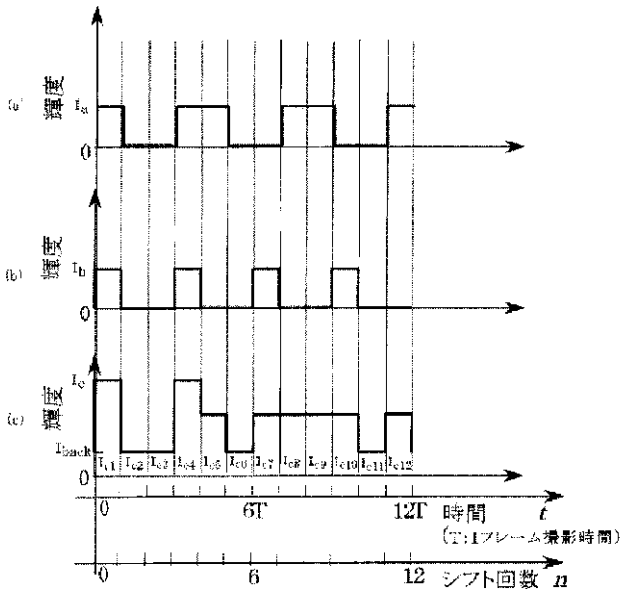
【図7】



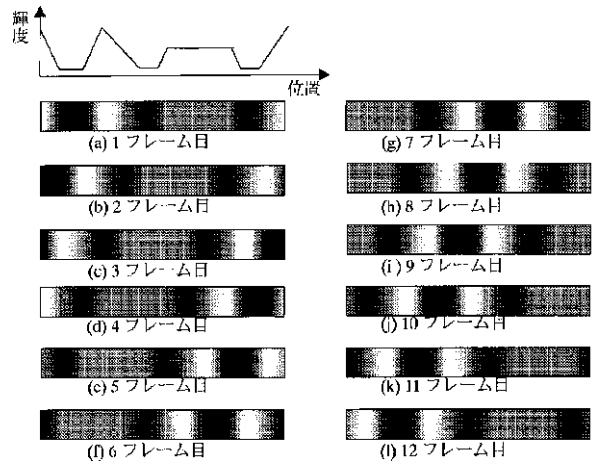
【図6】



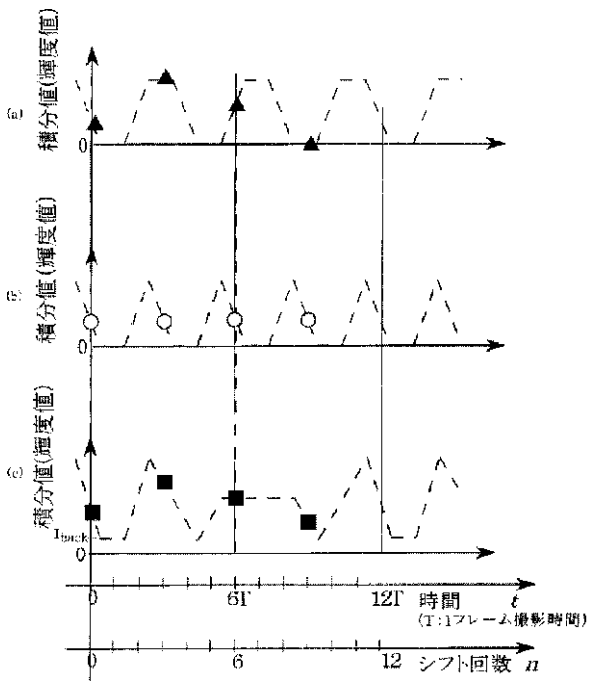
【 図 3 】



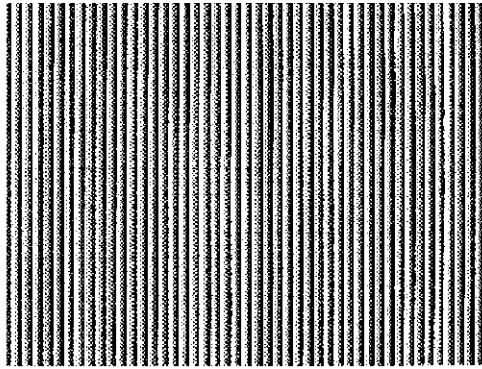
【 図 4 】



【 図 5 】



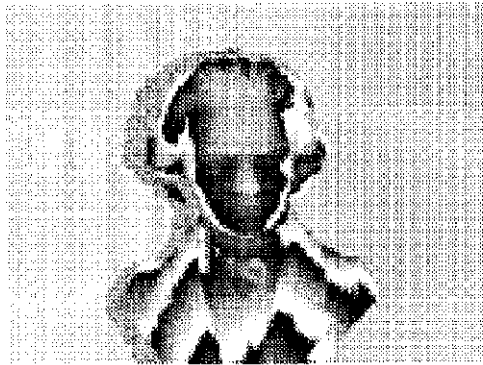
【 図 8 】



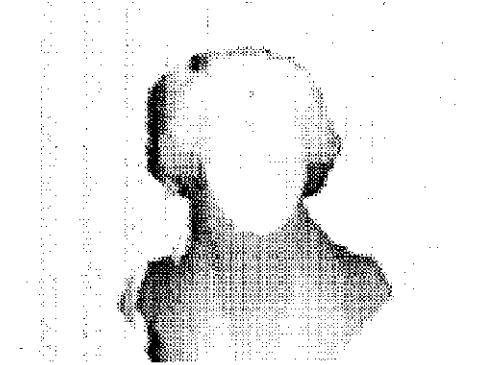
(e) 1:2 成分の位相 (基準板)



(f) 位相差分布画像  
(1:1 成分)



(g) 位相差分布画像  
(1:2 成分)



(h) 位相接続画像

フロントページの続き

(56) 参考文献 特開2001 - 4338 ( J P , A )  
特開2002 - 90126 ( J P , A )  
特開2003 - 14426 ( J P , A )

(58) 調査した分野 ( Int . Cl .<sup>7</sup> , D B 名 )  
G01B 11/00 - 11/30