

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-90126
(P2002-90126A)

(43) 公開日 平成14年3月27日 (2002.3.27)

(51) Int.Cl.⁷
G 0 1 B 11/24

識別記号

F I
G 0 1 B 11/24

ターマコード* (参考)
A 2 F 0 6 5
K

審査請求 有 請求項の数 2 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2000-279457 (P2000-279457)

(22) 出願日 平成12年9月14日 (2000.9.14)

特許法第30条第1項適用申請有り 2000年3月15日 日本機械学会関西学生会開催の「日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会」において文書をもって発表

(71) 出願人 396019376

和歌山大学長
和歌山県和歌山市栄谷930

(72) 発明者 藤垣 元治

和歌山県和歌山市木ノ本694-1 シティ
キノモト205

(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

(74) 代理人 100059258

弁理士 杉村 暁秀 (外2名)

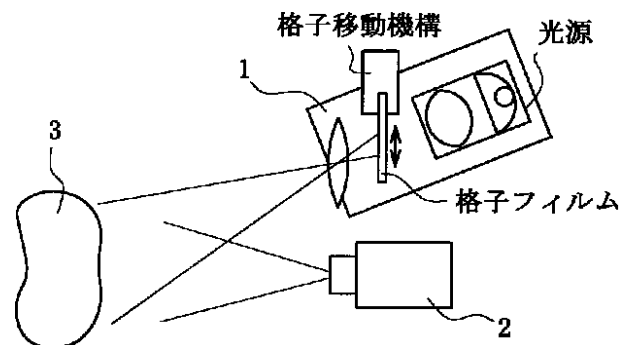
Fターム(参考) 2F065 AA53 AA65 BB15 DD03 DD06
FF04 GG23 HH06 JJ03 JJ26
MM14 QQ03 QQ14 QQ24

(54) 【発明の名称】 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

(57) 【要約】

【課題】 リアルタイムで位相接続が可能な形状変形計測方法を提供する。

【解決手段】 試料に投影する1ピッチを明暗比1:2または1:1に分けた互いにピッチおよび色が異なる複数の矩形波状の格子の位相を連続的にシフトしながら、1周期の位相シフトごとに3つまたは4つの格子画像を順次取得して各格子に関するそれぞれ対応する第1~第3または第1~第4フレームメモリに更新しながら格納し、これら各格子に関する第1~第3または第1~第4フレームメモリに格納された各画像の対応する画素の輝度値に基づいて、予め演算して求めた位相値に対応する輝度値を格納する各格子に関する3次元位相算出テーブルから対応する位相値の輝度値を画素ごとに各格子に関して読み出して、各格子に関する位相値の輝度値を位相接続し、前記試料の位相分布画像を各格子に関してリアルタイムで得る。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 試料に投影する1ピッチを明暗比1:2に分けた矩形波状の格子の位相を連続的にシフトしながら、1周期の位相シフトごとに3つの格子画像を順次取得してそれぞれ対応する第1~第3フレームメモリに更新しながら格納し、これら第1~第3フレームメモリに格納された各画像の対応する画素の輝度値に基づいて、予め演算して求めた位相値に対応する輝度値を格納する3次元位相算出テーブルから対応する位相値の輝度値を画素ごとに読み出して、前記試料の位相分布画像をリアルタイムで得ることを特徴とするリアルタイム形状変形計測方法。

【請求項2】 試料に投影する1ピッチを明暗比1:2または1:1に分けた互いにピッチおよび色が異なる複数の矩形波状の格子の位相を連続的にシフトしながら、1周期の位相シフトごとに3つまたは4つの格子画像を順次取得して各格子に関するそれぞれ対応する第1~第3または第1~第4フレームメモリに更新しながら格納し、これら各格子に関する第1~第3または第1~第4フレームメモリに格納された各画像の対応する画素の輝度値に基づいて、予め演算して求めた位相値に対応する輝度値を格納する各格子に関する3次元位相算出テーブルから対応する位相値の輝度値を画素ごとに各格子に関して読み出して、各格子に関する位相値の輝度値を位相接続し、前記試料の位相分布画像を各格子に関してリアルタイムで得ることを特徴とするリアルタイム形状変形計測方法。

【発明の詳細な説明】**【0001】**

【発明の属する技術分野】本発明は、物体の形状を計測する方法に関するものであり、特に非接触形状計測方法に関するものである。

【従来の技術】

【0002】非接触で3次元形状計測を行う方法として、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別の方向からテレビカメラで撮影すると、物体の形状に応じてゆがんだ格子画像が得られる。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で前記物体の等高線画像を得ることができる。等高線の位相値は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。

【0003】さらに特願平11-179950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が開示されている。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。この従来の方法は、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。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、このような従来の方法では、過去の4フレームの画像から位相分布画像を求めているため、物体が移動することによる誤差が生じる。さらなる問題点は、等高線の位相接続（位相の連続化）を行うことができないことである。したがって、計測結果の高さの分解能が格子の位相の分解能と同等になってしまう。そのため、高さの差が比較的大きな物体の形状計測を行う場合には、分解能が悪くなるか、繰り返しの位相パターンとして結果を得なければならない。また、計測結果として得られる位相差画像は、実際の位相値を2で割った余りとして表現されるという欠点もある。

【0005】位相接続を行う方法の1つにピッチの異なる複数の格子を用いる方法がある。この方法は、各画素ごとに位相接続を行うことができるため、段差などの不連続部分のある物体であっても位相接続を行うことができる。しかしながら、この方法においては、複数の格子を切り替えて計測を行わなければならないため、リアルタイムで位相接続を行うことができない。

【0006】したがって、かかる点に鑑みてなされた本発明の目的は、物体が移動することによる誤差を軽減し、リアルタイムで位相接続が可能な形状変形計測方法を提供しようとするものである。

【0007】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する請求項1に係るリアルタイム形状変形計測方法の発明は、試料に投影する1ピッチを明暗比1:2に分けた矩形波状の格子の位相を連続的にシフトしながら、1周期の位相シフトごとに3つの格子画像を順次取得してそれぞれ対応する第1~第3フレームメモリに更新しながら格納し、これら第1~第3フレームメモリに格納された各画像の対応する画素の輝度値に基づいて、予め演算して求めた位相値に対応する輝度値を格納する3次元位相算出テーブルから対応する位相値の輝度値を画素ごとに読み出して、前記試料の位相分布画像をリアルタイムで得ることを特徴とするものである。

【0008】請求項1に係る発明によると、過去の3フレームの画像から位相分布画像が得られるため、物体が移動することによる誤差が軽減される。

【0009】請求項2に係るリアルタイム形状変形計測方法の発明は、試料に投影する1ピッチを明暗比1:2または1:1に分けた互いにピッチおよび色が異なる複数の矩形波状の格子の位相を連続的にシフトしながら、

1周期の位相シフトごとに3つまたは4つの格子画像を順次取得して各格子に関するそれぞれ対応する第1～第3または第1～第4フレームメモリに更新しながら格納し、これら各格子に関する第1～第3または第1～第4フレームメモリに格納された各画像の対応する画素の輝度値に基づいて、予め演算して求めた位相値に対応する輝度値を格納する各格子に関する3次元位相算出テーブルから対応する位相値の輝度値を画素ごとに各格子に関して読み出して、各格子に関する位相値の輝度値を位相接続し、前記試料の位相分布画像を各格子に関してリアルタイムで得ることを特徴とするものである。

【0010】請求項2に係る発明によると、各画素ごとに位相接続を行うことができるため、段差などの不連続部分のある物体であっても位相接続を行うことができ、したがって、従来の方法によるよりもダイナミックレンジが広くなり、高分解能に形状計測を行うことができる。

【0011】

【発明の実施の形態】図1は、本発明による形状変形計測方法を実現する格子投影装置1と、CCDカメラ2と、計測対象物体3の配置を示す。格子投影装置1には、格子移動機構があり、取り付けられた格子フィルムを等速で任意の速度で移動させることができる。投影する格子は、図2に示すように、1ピッチを明暗比1:2

$0 < \theta / 3$ または $5 / 3 < 2$ の場合 (Bが最小の場合)

$$\begin{aligned} A &= (3T/2) (- + \theta / 3) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ B &= I_0 T \\ C &= (3T/2) (+ \theta / 3) (I_1 - I_0) + I_0 T \end{aligned} \quad (1)$$

$\theta / 3 < 2$ の場合 (Aが最小の場合)

$$\begin{aligned} A &= I_0 T \\ B &= (3T/2) (- \theta / 3) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ C &= (3T/2) (- +) (I_1 - I_0) + I_0 T \end{aligned} \quad (2)$$

$< 5 / 3$ の場合 (Cが最小の場合)

$$\begin{aligned} A &= (3T/2) (-) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ B &= (3T/2) (- + 5 / 3) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ C &= I_0 T \end{aligned} \quad (3)$$

これらの式より初期位相 θ は、

$$\theta = (\theta / 3) (C - A) / (C + A - 2B) \quad (B = \min(A, B, C) \text{ の場合})$$

$$\theta = (\theta / 3) (B - C) / (B + C - 2A) + 2 / 3 \quad (A = \min(A, B, C) \text{ の場合})$$

$$\theta = (\theta / 3) (A - B) / (A + B - 2C) + 4 / 3 \quad (C = \min(A, B, C) \text{ の場合}) \quad (4)$$

と求めることができる。

【0014】上記の式(4)を用いて位相値を高速に算出するために、入力データ数3、出力データ数1の三次元位相算出テーブルを作成する。画像の1画素を表すビット数を8ビットとした場合の三次元位相算出テーブルを図4に示す。(A, B, C)の組み合わせごとに、式(4)を予め計算しておき、点(A, B, C)における

に分けた矩形波状の格子を用いる。その格子を、1/30秒間(CCDカメラの1フレームの撮影時間)に1/3ピッチの等速でシフトさせながら計測物体3に投影する。その格子が投影された物体をCCDカメラ2で撮影する。CCDカメラ2は、1/30秒間に受けた光の強度を電荷として蓄え、それを輝度として画像に変換する。そのため得られる画像は、画素ごとに1/30秒間シフトされた格子の輝度の積分値が得られる。

【0012】図3に、CCD上のある1画素における時間に対する輝度の変化を示す。図3(a)～(d)にそれぞれ、初期位相 θ の値が $\theta = 0$ 、 $0 < \theta / 3$ または $5 / 3 < 2$ 、 $\theta / 3 < 2$ 、 $\theta < 5 / 3$ における時間と輝度の関係を示す。ここで、初期位相とは、時刻 $t = 0$ における格子の位相値のことであり、0から2 π の値を持つとする。

【0013】図3(b)～(d)におけるA、B、Cは、CCDカメラで撮影される画像1フレーム毎の輝度の時間積分値を表す。ここで、 I_0 、 I_1 は、投影格子の最小輝度、最大輝度を表し、 θ は初期位相、Tは1フレーム撮影するのに要する時間を表す。なお、ここで用いる明暗比が1:2の矩形波状の格子の位相0の位置は、白の部分の中央部とする。A、B、Cの値は次のようになる。 $\min(A, B, C)$ はA、B、Cの最小値とする。

値として位相算出テーブルを作成する。

【0015】上述した積分型位相シフト法を用いた位相解析回路を図5に示す。入力された格子画像はA/D変換された後、1フレーム撮影ごとに発生するフレーム同期信号によってフレームメモリA～Cに順に格納される。フレームメモリA～Cに格納された画像は、位相算出テーブルによって、即座に位相値に変換され、位相分

布画像として出力される。フレームメモリA～Cは、1フレームごとに順次更新されるので、結果的に毎フレームごとに位相分布画像が出力されることになる。

【0016】物体の形状または変形の計測の前には、まず、基準板（平面）の位相分布を求める。そのために、まず基準位相記憶制御信号によってスイッチSを入れ、その時点での位相分布画像をフレームメモリに格納する。次に計測物体を設置し、位相差分算回路により、毎フレームごとに位相分布画像と基準位相の差が計算されるので、結果的に毎フレームごとに位相差分布画像（すなわち高さ分布画像）が出力されることになる。

【0017】2通りのピッチの格子を用いた位相接続方法を説明する。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。

【0018】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2n（nは整数）を加えることによって、連続的な位相値を

$$c = 4(1 - 2) \quad (1) \\ c = 4(1 - 2 + 2) \quad (2)$$

【0021】上述した位相接続方法を用いて、 c_1 と c_2 を入力とし、式(5)で求めた値を c_c として出力するテーブルを作成すれば、リアルタイムで位相接続を行うことが可能となる。この位相接続テーブルと、上記の明暗比1：2の格子の位相解析手法および特願平11-179950号明細書で開示されている位相解析回路を用いて、図8に示すようなリアルタイム位相接続回路を作成することができる。図6に示した2色のカラー格子を投影し、それを撮影した画像をこの回路に入力することによって、毎フレームごとに位相接続された位相差分布画像が出力されることになる。

【0022】図9に、上記で説明した、明暗比1：2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を用いて位相分布が得られることを確認した画像を示す。図9(a)、(b)、(c)は、図3(b)～(d)におけるA、B、Cにそれぞれ対応する画像である。明暗比が1：2の矩形波を積分型位相シフト法により連続的に位相シフトさせながら撮影すれば、このような輝度分布を持つ画像が得られる。図9(a)、(b)、(c)から求めた位相分布画像を図9(d)に示す。正しく位相分布が得られていることがわかる。

【0023】次に、実際の物体に明暗比が1：2の矩形波格子を投影し、連続的に位相シフトさせながら撮影した連続する3フレームの画像を図10(a)、(b)、(c)に示す。これらの画像から求めた位相分布画像を図10(d)に示す。また、予め同じ方法により得てい

求めることである。位相接続を行う方法のひとつに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。本発明では、ピッチの異なる格子をその色を変えることによって同時に物体に投影し、撮影して得られる画像から、上記の明暗比1：2の格子の位相解析手法および特願平11-179950号明細書で開示されている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リアルタイムとして求めることができる。

【0019】図6に投影する格子の輝度分布を示す。赤格子は明暗比1：2とし、青格子は明暗比1：1とする。赤格子のピッチは青格子のピッチの3/4とする。これらの2色の格子を同一のフィルムに焼き付ける。または、ハーフミラー等を用いて赤格子撮影画像と、青格子撮影画像を重ね合わせてもよい。

【0020】図7に赤格子の位相接続前の位相分布 c_1 と、青格子の位相接続前の位相分布 c_2 と、赤格子の位相接続後の位相分布 c_c とを示す。0 $<c_c<8$ の範囲では、式(5)によって、 c_c を求めることができる。

2の場合)

$$1 < c_2 \text{ の場合) } \quad (5)$$

た基準板（平板）の位相分布を図10(e)に示す。図10(d)の画像と図10(e)の画像から求めた位相差分布画像を図10(f)に示す。物体の高さ分布画像が得られていることがわかる。ただし、こ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の繰り返しとなる。

【0024】上記では、2通りのピッチの格子を用いた位相接続方法を例として説明したが、3つ以上の格子を使用することももちろん可能である。

【0025】図11に、カラーの格子を用いて位相の連続化を行った結果を示す。矩形波状の白黒比1：2の格子（ピッチ3）と矩形波状の白黒比1：1の格子（ピッチ4）をそれぞれ青色と赤色にして同一のカラーフィルムに焼き付けて物体上に投影した。物体上に投影された青格子と赤格子をカラーCCDカメラで撮影し、それぞれの色成分ごとに分離した画像を図11aと11bに示す。図11cと11dには、それぞれの格子の位相差と基準板の位相値との差の分布画像（位相差分布画像）を示す。図11cと11dの2つの画像より、図7および式(5)に示す方法によって位相の連続化を行った結果として得られた連続化後の位相差分布画像を図11eに示す。図11eの連続化後の位相分布は、物体の高さ分布を表しており、連続化前の位相分布と比べて4倍の分解能を持つ。

【0026】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、各画素ごとに位相接続を行うことができるため、段差などの不

連続部分のある物体であっても位相接続を行うことができ、したがって、従来の方法によるよりもダイナミックレンジが広くなり、高分解能に形状計測を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明による形状変形計測方法を実現する装置の配置を示す線図である。

【図2】 物体に投影する格子の場所に対する輝度を示すグラフである。

【図3】 a、b、c、dは、CCD上のある1画素における時間に対する輝度の変化を示す線図である。

【図4】 三次元位相算出テーブルの概念を示す図である。

【図5】 位相解析回路の構成を示すブロック図である。

【図6】 投影する格子の輝度分布を示すグラフである。

【図7】 赤格子の連続化前の位相分布と、青格子の連続化前の位相分布と、赤格子の連続化後の位相分布とを示すグラフである。

【図8】 リアルタイム位相接続回路の構成を示すブロック図である。

【図9】 a、b、c、dは、積分型位相シフト法を用いた位相解析アルゴリズムを用いて得られた位相分布の画像である。

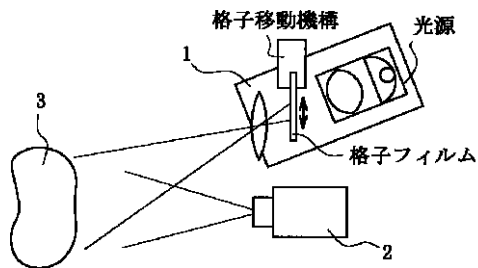
【図10】 a、b、c、dは、連続的に位相シフトさせながら撮影した連続する3フレームの画像であり、eは、予め同じ方法により得ていた基準板（平板）の位相分布であり、fは、dの画像とeの画像から求めた位相差分布画像である。

【図11】 aおよびbは、物体上に投影された青格子と赤格子をカラーCCDカメラで撮影し、それぞれの色成分ごとに分離した画像であり、cおよびdは、それぞれの格子の位相差と基準板の位相値との差の分布画像であり、eは、位相の連続化を行った結果として得られた連続化後の位相差分布画像である。

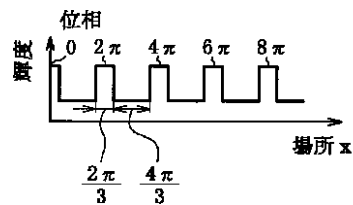
【符号の説明】

- 1 格子投影装置
- 2 CCDカメラ
- 3 計測対象物体

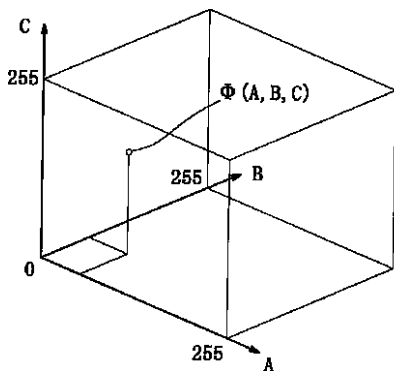
【図1】



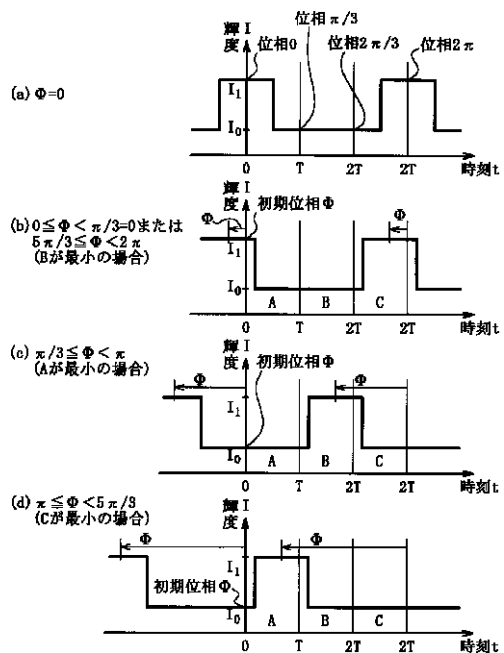
【図2】



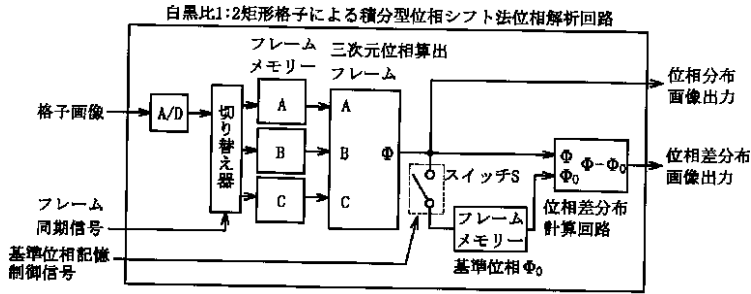
【図4】



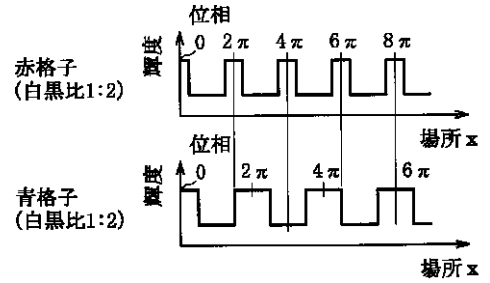
【図3】



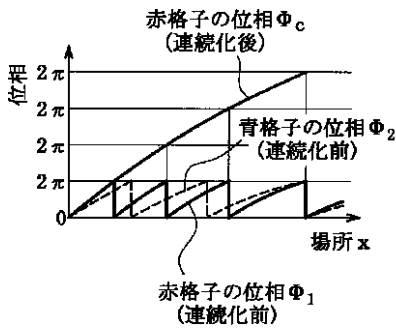
【図5】



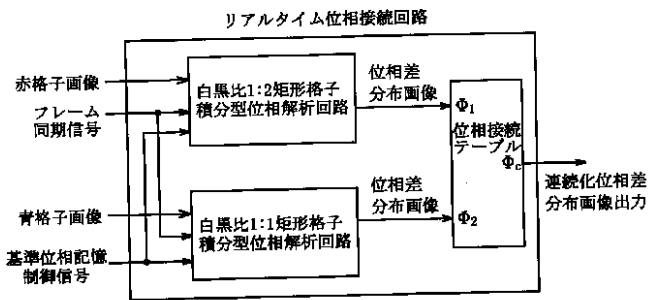
【図6】



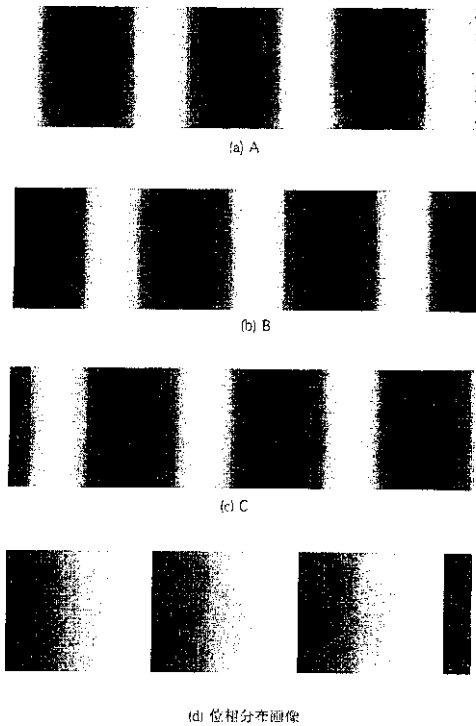
【図7】



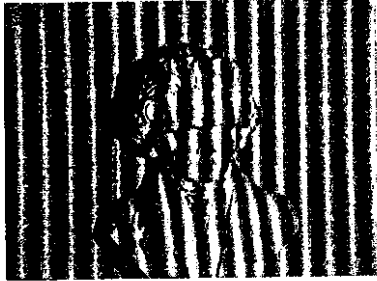
【図8】



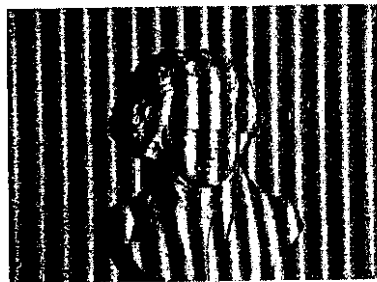
【図9】



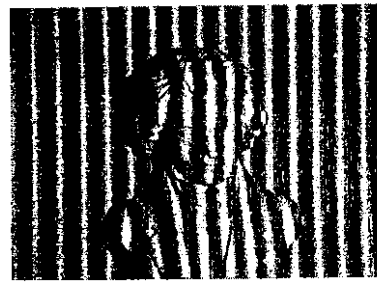
【図10】



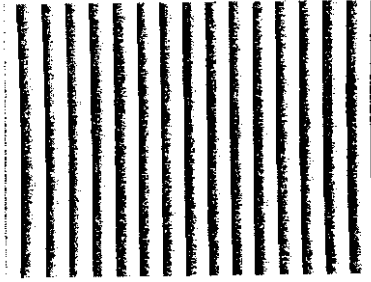
(a)A



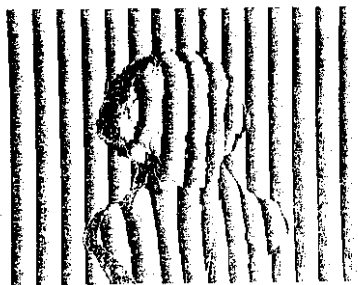
(b)B



(c)C



(c)基準板の位相分布画像

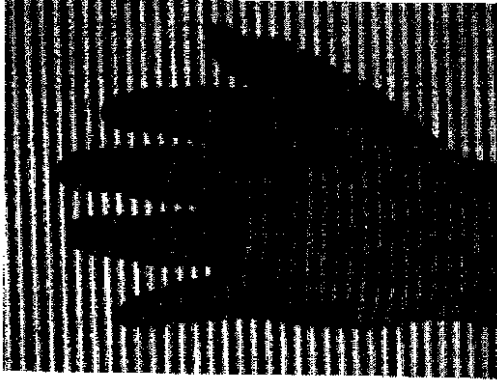


(d)計測物体の位相分布画像

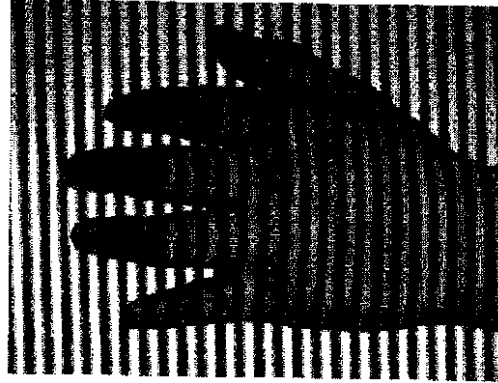


(e)五位相差画像

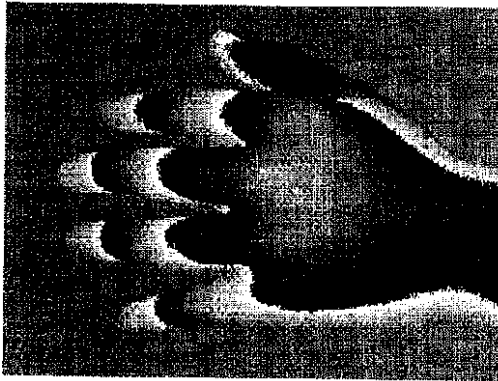
【図11】



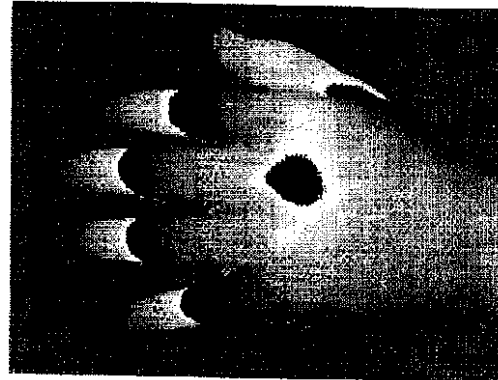
(a) 青格子画像 (白黒比 1 : 2)



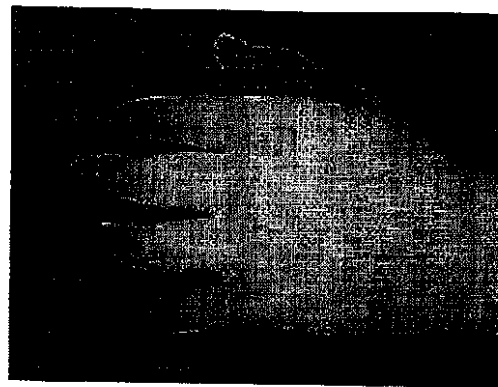
(b) 赤格子画像 (白黒比 1 : 1)



(c) 青格子位相分布画像



(d) 赤格子位相分布画像



(e) 連続化後の位相分布画像