

# ESPIでの4画面位相シフト法における ランダムなシフト誤差補正法\*

安達正明\*\* 北川洋一\*\*\* 松本哲也\*\*\* 稲部勝幸†

Correction Method of Random Shift Error for 4-step Phase Shifting ESPI

Masaaki ADACHI, Youichi KITAGAWA, Tetsuya MATSUMOTO and Katsuyuki INABE

A new method capable for reducing the amount of error in the ESPI system is proposed. This method is applicable without any additional hardware element in the system. In the method, no correlation is assumed between the shifting value and the amount of error. Calculation of the error correction is made with two assumptions; (a) error of shifting value can be expressed with the first order approximation, (b) the phase distributes uniformly in whole range from  $-\pi$  to  $\pi$  in a whole-field speckle pattern. Validity of this method is demonstrated through experiments and the result is compared with former method.

**Key words** : ESPI, phase shifting, error correction, random shift error

## 1. はじめに

工業製品は特殊な物を除いてほとんどが粗面を持つ。この粗面の変形をレーザ光とカメラを用いて非接触、高精度に測定する方法として、ESPI††(Electronic Speckle Pattern Interferometry)に位相シフト法(干渉像の位相を測定する手法)を組み合わせた方法が報告されている<sup>1)~3)</sup>。この方法は非接触性、高精度性に加えて操作の簡便さ、測定の高速度や長い作動距離などの特長も有しており、広い工業分野での応用が期待されるものである。

使われている位相シフト法は当初、光学表面で反射された光が作る干渉画像に対して考案された<sup>4)</sup>。測定では、光の波長の1/100オーダの精度で光路差を波長の1/4倍ずつシフトさせながら、干渉画像を複数枚コンピュータに取り込み光干渉の位相を計算する。そのため光路差のシフトにはnmの精度が必要であり、広くピエゾ(圧電)素子が使われて来た。しかし、ピエゾ素子には少しだが非線形応答が付きまとう。これは小さいとは言え影響は無視できなく、非線形シフト誤差の補正法に関してこれまで多くの研究が行われて来ている<sup>5)~9)</sup>。

工業製品の粗面の変形測定に位相シフト法を用いる場合も、素子の非線形シフト誤差の補正は必要である。しかしそれ以上に大きな影響を及ぼすのは、長い作動距離から来る空気の揺らぎなど外乱によるシフトの誤差である。この外乱による誤差はランダムであり、ピエゾ素子の非線形シフト誤差補正で使われるシフト量と誤差量が持つ相関関係のようなものはない。従って、より高精度な計測を行うためには、なんらかの新しい誤差補正法が求められることになる。その中で門野らは、レーザ光が作るスペックルの位相の統計分布<sup>10)</sup>を利用すると、3画面を

用いる位相シフト法の場合にランダムなシフト誤差をすべて補正できることを報告している<sup>10)</sup>。一方、Katoらはスペックル干渉画像の一部の平均強度の変化を検出し、半導体レーザの波長可変性を用いて外乱によらず位相シフト量をモニタする方法を提案し、4画面を用いる位相シフト法で変形測定精度 $\lambda/30$ 以上を達成している<sup>11)</sup>。さらに、Haasteren<sup>12)</sup>やNakadate<sup>13)</sup>らは、3台のカメラで位相シフトした画像を同時に取り込み、外乱によるシフト誤差の影響を受けない3画面位相シフト法を報告している。また最近、Dobroiuらも光学表面を対象に位相の統計データを利用する3画面位相シフト法でのランダムなシフト誤差補正法を提案している<sup>14)</sup>。

本論文では、位相シフト法で広く用いられて来た4画面位相シフト法において、外乱によるランダムなシフト誤差を補正する方法を提案している。本方法では、外乱によるランダムな誤差は順次取り込まれる画像間のシフト量のみに影響し、画像内の位相の空間的变化には影響しない(表題のランダムなシフト誤差はこの意味とした)としている。そして、シフト誤差は大きくなく誤差を一次近似で表現できると仮定した。4画面位相シフト法では2枚目、3枚目、4枚目の画像取込み時に $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ のシフト誤差が存在する。我々はこれらの誤差に関し、最近報告したピエゾ素子の非線形シフト誤差評価法を用いて $\delta_2$ と $\delta_3 - \delta_1$ を評価した<sup>15)</sup>。次に、スペックル位相の統計的性質<sup>10)</sup>を利用して、 $\delta_3 + \delta_1 - \delta_2$ を評価した。これら3つの評価値からシフト誤差 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ を計算した。3画面位相シフト法ではシフト誤差は2個となるが、用いる画面数が少ないため4画面位相シフト法に比べ、量子化誤差や光電変換素子の雑音の点で精度的に劣るとされる<sup>16)</sup>。本方法は広く用いられてきた4画面位相シフト法に適用でき、また、3画面を用いる誤差補正法より高精度に位相を評価できる可能性を持つ方法と

\* 原稿受付 平成10年2月12日

\*\* 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

\*\*\* 兵庫県工業技術センター(神戸市須磨区行平町3-1-12)

† 金沢大学工学部

†† 電子式スペックル干渉計と訳される。乾板をCCDカメラで置き換えたホログラフィー干渉法であり、データ処理装置へ取込んだ2つ以上の干渉画像間の演算によって変形情報を実時間でモニタ画面に出力する方法

考えられる。

## 2. 理 論

いま、 $\pi/2$ 前後の位相シフトを3回繰り返しながら、干渉画像を4枚 ( $i=1,2,3,4$ ) 取り込むとし、各シフトでの $\pi/2$ からの小さなシフト誤差を $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ とおく。この時、画像内の任意の点aで取り込まれる4枚の画像の光強度 $I_{ai}$  ( $i=1,2,3,4$ )は一次近似を用いて次のように表現される。

$$I_{a1} = I_a + A \cos \phi \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= I_a + A \cos(\phi + \frac{\pi}{2} + \delta_1) \\ &\approx I_a - A \sin \phi - A \delta_1 \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_{a3} &= I_a + A \cos(\phi + \pi + \delta_2) \\ &\approx I_a - A \cos \phi + A \delta_2 \sin \phi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_{a4} &= I_a + A \cos(\phi + \frac{3\pi}{2} + \delta_3) \\ &\approx I_a + A \sin \phi + A \delta_3 \cos \phi \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $I_a$ はバイアスレベルであり、 $A$ はモジュレーション、 $\phi$ は初期位相である。すべて測定位置 $(x,y)$ の関数であるが、記述の簡単化のため以後これを省く。いま式(1), (2), (4)より、 $I_a \sin \phi$ を消去すると

$$I_{a2} + I_{a4} - 2I_{a1} = (\delta_3 - \delta_1 - 2)A \cos \phi \quad (5)$$

を得る。一方、式(1), (2)と式(3), (4)より $I_a$ を消去して次の2式

$$\begin{aligned} I_{a1} - I_{a2} &= (\delta_1 + 1)A \cos \phi + A \sin \phi \\ I_{a3} - I_{a4} &= -(\delta_3 + 1)A \cos \phi - (1 - \delta_2)A \sin \phi \end{aligned} \quad (6)$$

を得る。さらにこの両式から $A \sin \phi$ を消去すると

$$\begin{aligned} (1 - \delta_2)(I_{a1} - I_{a2}) + I_{a3} - I_{a4} \\ = \{(\delta_1 + 1)(1 - \delta_2) - (\delta_3 + 1)\}A \cos \phi \end{aligned} \quad (7)$$

を得る。ここで式(7)/式(5)の右辺に着目すると、右辺は $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ のみの式となり、測定点によらない。故に画像内の2つの点a, bに関し、式(7)/式(5)の左辺を等しいと置くと、

$$\frac{(1 - \delta_2)(I_{a1} - I_{a2}) + I_{a3} - I_{a4}}{I_{a2} + I_{a4} - 2I_{a1}} = \frac{(1 - \delta_2)(I_{b1} - I_{b2}) + I_{b3} - I_{b4}}{I_{b2} + I_{b4} - 2I_{b1}} \quad (8)$$

が成立する。これより $\delta_2$ を求めることができ次式を得る。

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \frac{(I_{a2} + I_{a4} - 2I_{a1})(I_{b1} - I_{b2} + I_{b3} - I_{b4})}{(I_{b2} + I_{b4} - 2I_{b1})(I_{a2} - I_{a1}) - (I_{a2} + I_{a4} - 2I_{a1})(I_{b2} - I_{b1})} \\ &\quad - \frac{(I_{b2} + I_{b4} - 2I_{b1})(I_{a1} - I_{a2} + I_{a3} - I_{a4})}{(I_{b2} + I_{b4} - 2I_{b1})(I_{a2} - I_{a1}) - (I_{a2} + I_{a4} - 2I_{a1})(I_{b2} - I_{b1})} \end{aligned} \quad (9)$$

このように初期位相に対して位相が $\pi$ だけ進んだ所でのシフト誤差 $\delta_2$ を、4枚のシフト画像の2点の光強度から求めることができる。同じようにして式(2)の位相を初期位相と見なすと、 $\pi$ だけ位相の進んだ点でのシフト誤差 $\delta_3 - \delta_1$ も求められる。その結果、次式を得る。

$$\begin{aligned} \delta_3 - \delta_1 &= \frac{(I_{a3} + I_{a1} - 2I_{a2})(I_{b2} - I_{b3} + I_{b4} - I_{b1})}{(I_{b3} + I_{b1} - 2I_{b2})(I_{a3} - I_{a2}) - (I_{a3} + I_{a1} - 2I_{a2})(I_{b3} - I_{b2})} \\ &\quad - \frac{(I_{b3} + I_{b1} - 2I_{b2})(I_{a2} - I_{a3} + I_{a4} - I_{a1})}{(I_{b3} + I_{b1} - 2I_{b2})(I_{a3} - I_{a2}) - (I_{a3} + I_{a1} - 2I_{a2})(I_{b3} - I_{b2})} \end{aligned} \quad (10)$$

このように $\delta_2$ と $\delta_3 - \delta_1$ が4枚の画像から計算できる。

一方、反射面の粗さが光の波長以上に粗くて反射光のスペックルが十分に発達している場合 (ESPI測定でのスペックル干渉像は通常この状態にある)、スペックル干渉像の位相 $\phi$ は $0 \sim 2\pi$ に一樣分布することが理論的に示されている<sup>9)</sup>。しかし誤差を伴う位相シフトでスペックルの位相を求めた場合、位相分布は一樣分布でない可能性を持つ。そこで次に誤差を伴う位相シフト法で計算される位相分布と誤差について調べる。

誤差を伴う位相シフトでの光強度は式(1)~(4)で与えられるので、この強度から4画面位相シフト法<sup>4)</sup>に従って $(I_{a4} - I_{a2}) / (I_{a1} - I_{a3})$ を計算すると次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{I_{a4} - I_{a2}}{I_{a1} - I_{a3}} &= \frac{\sin(\phi + \delta_3) + \sin(\phi + \delta_1)}{\cos(\phi) + \cos(\phi + \delta_2)} \\ &= \frac{\sin(\phi + \frac{\delta_3 + \delta_1}{2}) \cos(\frac{\delta_3 - \delta_1}{2})}{\cos(\phi + \frac{\delta_2}{2}) \cos(\frac{\delta_2}{2})} \end{aligned} \quad (11)$$

故に、次の関係が成立する。

$$\frac{(I_{a4} - I_{a2}) \cdot \cos(\frac{\delta_2}{2})}{(I_{a1} - I_{a3}) \cdot \cos(\frac{\delta_3 - \delta_1}{2})} = \frac{\sin(\phi + \frac{\delta_3 + \delta_1}{2})}{\cos(\phi + \frac{\delta_2}{2})} \quad (12)$$

左辺は式(9),(10)で与えられる $\delta_2$ と $\delta_3 - \delta_1$ 、取り込んだ4枚の画像から実際に計算できる量であり、これが右辺に示すように $\delta_2/2, (\delta_3 + \delta_1)/2$ の影響を強く受ける。そこで式(12)の左辺を新たに $\tan \theta$ と置き、測定点aとして観察領域内のすべての点を採り、その結果 $\phi$ が $0 \sim 2\pi$ に一樣分布するとして $\theta$ の理論的な分布を計算する。いま、 $\tan \theta = \sin\{\phi + (\delta_3 + \delta_1)/2\} / \cos(\phi + \delta_2/2)$ の微小変化を考えると次式が成立する。

$$d(\tan \theta) = d \left\{ \frac{\sin\left(\phi + \frac{\delta_3 + \delta_1}{2}\right)}{\cos(\phi + \frac{\delta_2}{2})} \right\}$$

∴

$$(1 + \tan^2 \theta) \cdot d\theta = \left\{ 1 + \tan^2\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right) \right\} \cdot \cos\left\{ \frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2} \right\} d\phi \quad (13)$$

$\phi$ が一様分布する時の $\theta$ の分布は $d\phi/d\theta$ で与えられるので、 $\theta$ の分布は次式となる。

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{(1 + \tan^2 \theta)}{\left\{1 + \tan^2 \left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right)\right\} \cdot \cos\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)} \quad (14)$$

ところで画像データから実際に計算できるのは $\phi$ ではなく $\theta$ だから、式(14)の右辺を $\phi$ を含まない形で表現し直す必要がある。式(12)より $\phi$ と $\theta$ の関係は、

$$\tan \theta = \frac{\sin\left(\phi + \frac{\delta_3 + \delta_1}{2}\right)}{\cos\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right)}$$

$$= \frac{\sin\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right) + \cos\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)}{\cos\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right)}$$

$$= \tan\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right) + \sin\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right) \quad (15)$$

∴

$$\tan\left(\phi + \frac{\delta_2}{2}\right) = \frac{\tan \theta - \sin\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)} \quad (16)$$

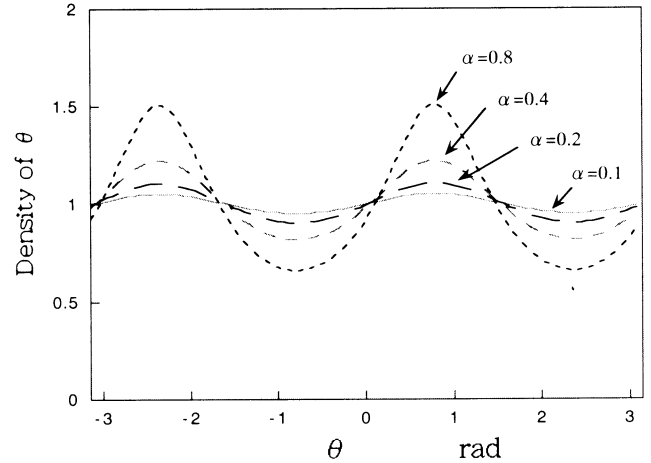
これを式(14)に代入すると次式を得る。

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1 + \tan^2 \theta}{\left[1 + \left\{\frac{\tan \theta - \sin\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)}\right\}^2\right] \cos\left(\frac{\delta_3 + \delta_1 - \delta_2}{2}\right)} \quad (17)$$

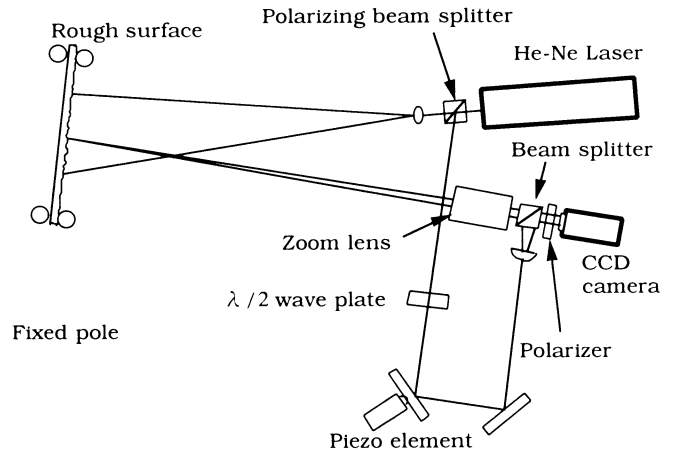
このように $\theta$ の分布は $\theta$ と $(\delta_3 + \delta_1 - \delta_2)/2$ で表現される。この関数を $\alpha = (\delta_3 + \delta_1 - \delta_2)/2$ をパラメータとして描画すると図1のようになる。

式(11)以降を要約すると、「画像データより式(12)の左辺を求め、これを $\tan \theta$ と置いて $\theta$ の分布を計算するとこの分布は理論的には式(17)の分布になる。故に画像から計算された $\theta$ の分布を式(17)を用いてフィッティングすると $(\delta_3 + \delta_1 - \delta_2)/2$ を求めることが可能」となる。

以上の議論より、式(9)から $\delta_2$ が、式(10)から $\delta_3 - \delta_1$ が、また $\theta$ の分布の式(17)へのフィッティングから $\delta_3 + \delta_1 - \delta_2$ が評価でき、不規則なシフト誤差すべてが計算できることが分かる。



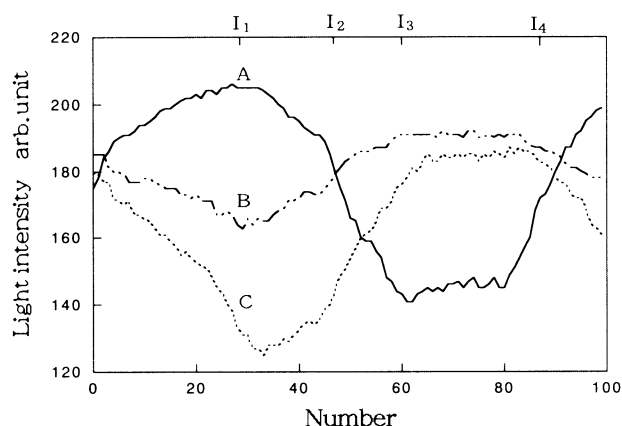
**Fig.1** Numerical calculation of probability density distribution function of  $\theta$ . The calculation is made using Eq.(17).  $\alpha = (\delta_3 + \delta_1 - \delta_2)/2$  is the only one parameter for the drawing



**Fig.2** Layout of optical setup for the ESPI experiment

### 3. 実験

提案した方法の有効性を調べるため図2に示す一般的なESPI光学系を組み上げて実験を行った。図2のHe-Neレーザは10mW出力であり、Zoom Lensはニッコール35-105である。またCCDカメラは東京電子工業(株)製のCS3400Dであり、試料面での約30mm×30mmを510×492ピクセルで取り込めるようになっている。画像信号のデジタル変換は8ビットである。実験では参照光学系のミラーの1つをピエゾ素子を用いて少しずつ押し、光源の波長( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )の約1/100倍の光路差をシフトさせながら256×256ピクセルの干渉画像を20秒かけて順に100枚コンピュータに取込んだ。これらの画像から画像の中心付近の点A、B、Cでの干渉光強度の変化を描画したものを図3に示す。取り込みに時間を要したため空気の流れ等により光強度が強く乱されている(画像を短時間に4枚だけ取り込む場合は図3のように大きく乱れない)。次にこの画像から位相差が互いに約 $\pi/2$ 異なる4つの時点での画像を抜き出した。これを $I_1, I_2, I_3, I_4$ とした(図3の上の軸参照)。この4つの画像から



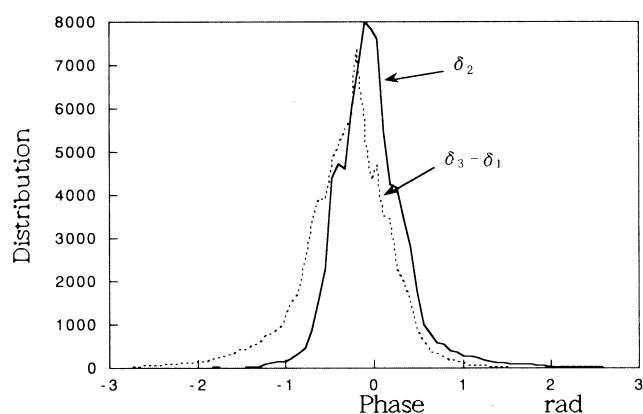
**Fig.3** Light intensity changes at three points in the speckle interferogram. Abscissa shows the sequential number of interferograms continuously captured to a computer. PZT element slowly moves the mirror during the captures

式(1)~(4)のモジュレーション  $A$  の大きな、画像中にほぼ均等な間隔に配置される400個の  $a$  点もしくは  $b$  点に相当する測定点を求めた。次にそれらの2点のすべての組合せ  ${}_{400}C_2=79800$  種の中から式(9),(10)の分母が大きいものを中心に約70000組を抜き出し、 $\delta_2$  と  $\delta_3 - \delta_1$  の分布を求めた。結果を図4に示す。 $\delta_2 = -0.07$ 、 $\delta_3 - \delta_1 = -0.20$  に大きなピークが存在し、 $\delta_2$  と  $\delta_3 - \delta_1$  を評価できることが分かる。

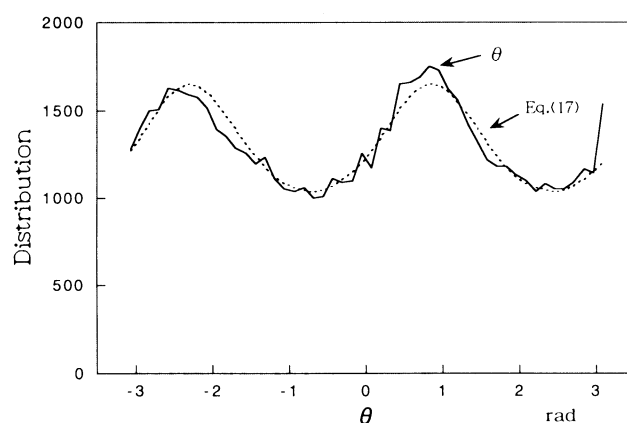
$I_1, I_2, I_3, I_4$  の画像データならびに上で得られた  $\delta_2$  と  $\delta_3 - \delta_1$  の値を基に、式(12)の左辺を計算し、計算値に  $\tan^{-1}$  を演算して各ピクセルごとの  $\theta$  を求め、画面全体についての  $\theta$  の分布を計算したものを図5に示す。また、これを式(17)でフィッティング( $\delta_3 + \delta_1 - \delta_2 = 0.46$ )したものを同じく図5に波線で示す。

以上から  $\delta_1 = 0.29$ 、 $\delta_2 = -0.07$  さらに  $\delta_3 = 0.10$  と  $\delta_1$  を評価した。これらの値と  $I_1, I_2, I_3, I_4$  の画像データならびに式(5)、式(6)の第2式から、シフト誤差を補正した  $A \sin \phi$ 、 $A \cos \phi$  を計算し、 $\tan^{-1}$  を通して初期位相  $\phi$  を場所の関数として求めた(位相図と呼ぶ)。

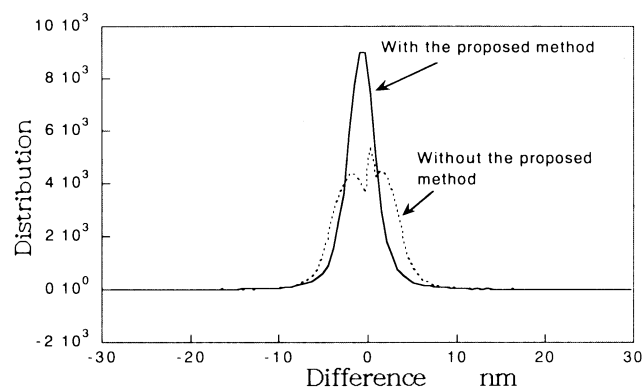
先に得られた  $\delta_1$  は少し大きく  $\delta_2$  は負なので、次に2枚目の画像として  $I_2$  の左隣、3枚目は  $I_3$  の右隣の画像を、取り込んだ画像から抜き出してこれを  $J_2, J_3$  とした。 $I_1, J_2, J_3, I_4$  に関して同じようにして  $\delta_1$  を抽出した結果、 $\delta_1 = 0.15$ 、 $\delta_2 = 0.07$ 、 $\delta_3 = 0.12$  と求まり、予想通り  $\delta_1$  は減って小さく、 $\delta_2$  は増えて正になった。この値を用いて  $I_1, J_2, J_3, I_4$  に関して同様の方法で補正した新しい位相図を求めた。先に求めた位相図と新しく求めた位相図の差を計算し、高さの変化量に換算してヒストグラムにしたものを図6に実線で示す。一方、提案した補正法を用いずに従来の方法で位相を求め、差を計算したものを図6に破線で示す。理論的には2つの組の初期位相は同じだから差は0になるはずである。補正値は分布が0近傍にまとまっており位相分布も左右に対称である。破線も分布は0近傍だが実線に比べ相対的に広がっており、かつ非対称である。 $I_1, I_2, I_3, I_4$  や  $I_1, J_2, J_3, I_4$  以外の画像に関して同様の方法で差を求めると、補正法を用いないものは0近傍に集まらない場合もいくつか存在したが、用いたものはいつも0近傍に集まった。図6で用いた高さのデータを三次元表示したものを図7に示す。三次元データは  $255 \times 255$  ピクセルの中から中心付近の  $50 \times 50$  の領域を拡大して描画した結果であり、ソフトウェアによる雑音除去や平均化等の操作は一切行っていない。純粋に本方法の効



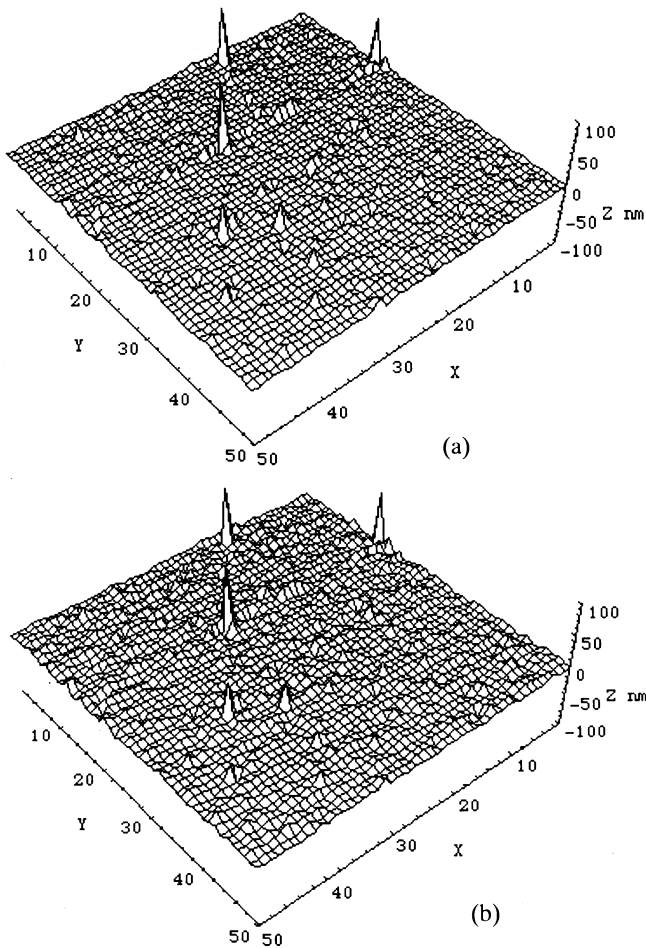
**Fig.4** Histogram of  $\delta_2$  and  $\delta_3 - \delta_1$ . These values are calculated using Eq. (9), (10) for many pair points in speckle interferograms. The value of peak positions indicates the most reliable  $\delta_2$  and  $\delta_3 - \delta_1$



**Fig.5** Distribution function of  $\theta$  calculated over all image pixels using  $\tan^{-1}[\{(I_4 - I_2) \cos(\delta_2/2) / (I_1 - I_3) \cos((\delta_3 - \delta_1)/2)\}]$ . The dotted line shows the distribution function of theoretical probability of  $\theta$  obtained by Eq.(17) with  $\delta_3 + \delta_1 - \delta_2 = 0.46$



**Fig.6** Height histogram calculated for interferograms with  $I_1, I_2, I_3, I_4$  and  $I_1, J_2, J_3, I_4$ . The solid line is calculated with the proposed error correction method and the dotted line is calculated without the proposed method



**Fig.7** 3-D expression of the height difference.  
 (a) calculated with the proposed error-correction method.  
 (b) calculated without the proposed method

果を評価するためである。図7の(a)は補正法によるものであり、(b)は従来の方法によるものである。(b)と比較して(a)では大きな信号以外の場所での変動幅は小さい。この二つの結果の違いは、提案するシフト誤差補正法が不規則なシフト誤差を含む干渉画像から初期位相を精度良く抽出できることを示す。(a)と(b)に大きな信号が含まれるのは、次の理由によると考えられる。すなわち、スペックル干渉では干渉じまが空間内に密にそしてランダムに生じており、画素によってはモジュレーションAが非常に小さくなる\*。この場合、電子回路のアナログ雑音やアナログ/デジタル変換での量子化雑音が相対的に大きくなり、 $\theta$ の計算値に大きな不規則雑音として影響する。雑音と考えられる大きな信号を全体の数の2~3%単純に取り除いた時、高さ変動の標準偏差は補正法で2.67nm、従来法で3.47nmと計算された。

#### 4. ま と め

干渉画像を4枚用いる ESPI 位相シフト法において、空気じょ

\* 干渉縞の暗い部分が画素の中心に来る時、暗い部分を両側から挟む画素内の明るい部分の位相は互いに符号が逆の値を採ると考えられる。その場合、光路差が変化しても画素の平均光強度は変化せず、モジュレーションAが非常に0に近くなる。

う乱など外乱による不規則なシフト誤差  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  を補正できる方法を提案した。本方法はシフト誤差が小さく、一次近似可能であるとして、数学的に  $\delta_2$  と  $\delta_3 - \delta_1$  を求め、また、スペックル像の位相が理論的に一様分布することから  $\delta_3 + \delta_1 - \delta_2$  を求めることにより、正確に初期位相を測定する方法である。実験では本方法により精度良く位相が求められることを確認できた。この方法は一般的なハードウェアで普通に取り込まれたスペックル画像に適用可能である。故に過去に取り込まれ保存されているスペックル画像にも応用できる方法である。

#### 参 考 文 献

- 1) K. Creath : Phase-shifting Speckle Interferometry, SPIE, **566** (International Conference on Speckle), (1985) 337.
- 2) S. Nakadate and H. Saito : Fringe Scanning Speckle pattern Interferometry, Appl. Opt., **24**, 14, (1985) 2172.
- 3) D. Kerr and J. R. Tyrer : The Application of Phase Stepping to Analysis of ESPI Fringe Patterns, SPIE, **814** (Photomechanics and Speckle Metrology), (1987) 379.
- 4) D. Malacara : Optical Shop Testing, John Wiley and Sons, Inc., New York, (1978) 409.
- 5) Y. Cheng and J. C. Wyant : Phase Shifter Calibration in Phase-shifting Interferometry, Appl. Opt., **24**, 18, (1985) 3049.
- 6) C. Ai and J. C. Wyant : Effect of Piezoelectric Transducer Nonlinearity on Phase Shift Interferometry, Appl. Opt., **26**, 6, (1987) 1112.
- 7) C. Joenathan : Phase-measuring Interferometry ; New Methods and Error Analysis, Appl. Opt., **33**, 19, (1994) 4147.
- 8) C.Liu, Z.Li, J.Chen and X.Yu : A New Algorithm for Compensating Phase Shifting Error, SPIE, **2003**, (1993) 431.
- 9) J. C. Dainty : Laser Speckle and Related Phenomena, Springer-Verlag, New York, (1975) 15.
- 10) H.Kadono and S.Toyooka : Statistical Interferometry Based on the Statistics of Speckle Phase. Opt. Lett., **16**, 12, (1991) 883.
- 11) J.Kato, I.Yamaguchi and Q.Ping : Automatic Deformation Analysis by a TV Speckle Interferometer using a Laser Diode, Appl. Opt., **32**, 1, (1993) 77.
- 12) A.J.P.V.Haasteren and H.J.Frankena : Real-time Displacement Measurement using a Multicamera Phasestepping Speckle Interferometer, Appl. Opt., **33**, 19, (1994) 4137.
- 13) S. Nakadate and M.Isshiki : Real-time Fringe Pattern Processing and its Applications, SPIE, **2544**, (1995) 74.
- 14) A.Dobroiu, P.C.Logofatu, D.Apostol and V.Damian : Statistical Self-calibrating Algorithm for Three-sample Phase-shift Interferometry, Meas. Sci. Technol., **8** (1997) 738.
- 15) 安達正明, 川崎修慈, 大杉博人, 稲部勝幸 : ピエゾ素子のシフト誤差を補正できる4画面位相シフト法, 精密工学会誌, **63**, 8, (1997) 1127.
- 16) J.V.Wingerden, H.J.Frankena and C.Smorenburg : Linear Approximation for Measurement Errors in Phase Shifting Interferometry, Appl. Opt., **30**, 19, (1991) 2718.