



スペックル相関法を用いた2次元面内変位分布の測定

盧 石 鎬*・山口 一郎

理化学研究所光工学研究室 〒351-01 和光市広沢 2-1

* 埼玉大学理工学研究科 〒338 浦和市下大久保 255

(1992年6月1日受付, 1992年9月29日受理)

Measurement of Two-Dimensional In-Plane Displacement Distribution by Speckle Correlation

Seokho NOH* and Ichirou YAMAGUCHI

The Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, Hirosawa, Wako 351-01

* Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255, Shimookubo, Urawa 338

(Received June 1, 1992; Accepted September 29, 1992)

Electronic speckle pattern correlation is applied to measurement of 2-D in-plane displacement distribution. The speckled images are taken by a CCD camera and stored in a frame memory with 512×480 pixels. These images are divided into 56 blocks each of which contains 64×64 pixels. Various methods for detecting the speckle displacement, such as cross-correlation, pattern matching and spatial filtering method, are compared. It has been shown that the correlation method is most stable. Each block of the deformed images is cross-correlated with the corresponding one by using 2-D FFT method. From the distribution of speckle displacement, which is determined by the peak positions of the 2-D cross-correlation, a distribution of in-plane object displacement is derived. For measuring displacement larger than that limited by speckle decorrelation, we replace the reference pattern of cross-correlation with a preceding pattern when peak height falls down. Since this replacement recovers the peak height, further speckle displacement can be detected and the arbitrarily large object displacement can be obtained by summing up the incremental displacement. We also considered how to improve the resolution and to shorten the processing time.

1. 序 論

スペックルはレーザー光で粗面を照射したときに生ずる不規則でコントラストの高い粒状模様で, 粗面の変位や変形によって移動するスペックルの移動量を検出すれば物体の変位, ひずみ, 速度などを求めることができる¹⁾.

スペックルパターンの移動を利用する測定法の特徴は簡単な光学系で, 非接触測定が可能な点にある. 代表的な計測法としてスペックル写真法と相関法がある.

スペックル写真法は変位前後のスペックルパターンを2重露光写真に記録し, そのネガ(スペックルグラム)の各部をレーザー・ビームで照射したときに生ずるヤング縞から, 定量的に変位量の測定を行う手法である. ヤ

ング縞は常に平行等間隔のパターンなので, 自動解析によって変位分布を得ることもできる²⁾. しかし, 写真記録を利用するために高速測定が困難である.

光電的なスペックル相関法は光電信号の相関関数のピーク位置からスペックル移動を求める手法で, オプトエレクトロニクス技術を導入しやすいため, 測定の自動化, 高速化などが期待できる. 既に1次元相関法や2次元相関法による変位などの測定に適用した例が報告されている³⁻⁵⁾. 1次元相関法を用いるレーザー・スペックルひずみ計³⁾は実時間相関計による高速処理ができるため, 現在実用化されているが, 測定範囲が細いビームのあたった1点に限られている. 2次元相関法を用いる手法は分布を与えるが, 膨大な計算量による処理時間の問題⁴⁾, 計算の高速化のために2値化を行ったときに起こ

る測定精度の低下, スペックルの変形によって生ずる測定範囲の制限⁵⁾など, 多くの問題があり, 応力やひずみの測定を目指した本格的な検討はされていなかった.

そこで本論文では, 2次元分布測定における最大の問題である処理時間の短縮を図るために, 空間フィルタ法, 相関法, マッチング法に対して処理時間および精度の比較検討を行う. 次に高精度を与える相関法において処理時間を短縮するために高速フーリエ変換法を用い, 小さな変位成分を加算することによる測定範囲の拡大, 相関ピークを内挿法により求めることによる測定精度の向上を実現する. そしてこれらの手法を2次元分布測定に適用するときの問題点について検討する.

2. 物体の変位とスペックル移動

通常の物体から生ずるスペックルパターンでは平均粗さ(凹凸の平均的な高低差)が入射光の波長に比べて大きく, 相関長(粗面の横方向に対する凹凸の構造)が光学系の分解限度に比べて細かいとき, その大きさの分布や表面の変位による動的な振舞いは物体表面の微細構造とは無関係で光学配置や変位の種類などの巨視的な配置だけに関係する.

Fig. 1で物体面(x, y 面)と像面(X, Y 面)において, 物点(q_x, q_y)での物体の変位(a_x, a_y, a_z)とその像点(Q_x, Q_y)= $-(mq_x, mq_y)$ (ただし, $m=L_i/L_o$ は結像倍率で L_o は物体距離, L_i は像面距離を示す)におけるスペックル移動(A_x, A_y)の関係は次式で与えられる³⁾.

$$A_x = -ma_x - 2a_z Q_x / L_o \quad (1a)$$

$$A_y = -ma_y - 2a_z Q_y / L_o \quad (1b)$$

面外変位 a_z が小さく, 次の条件式を満足するとき,

$$|a_z| << m|a_x|L_o/2|Q_x| \quad (2a)$$

$$|a_z| << m|a_y|L_o/2|Q_y| \quad (2b)$$

スペックル移動は次のように物体の面内変位に比例する.

$$A_x = -ma_x \quad (3a)$$

$$A_y = -ma_y \quad (3b)$$

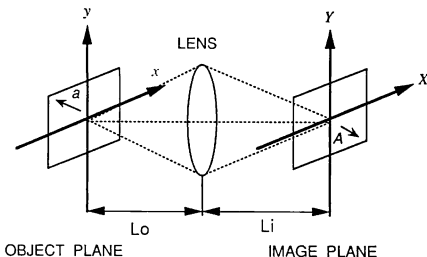


Fig. 1 Coordinate system for deriving speckle displacement in the image field.

3. 2次元スペックル移動の検出法

Fig. 2のように物体の全面をレーザー光で照射し, その結像面に生ずるスペックルパターンを CCD カメラで撮影し, 画像としてコンピュータに入力する. この画像を多数の小領域に分割し, 各領域ごとのスペックル移動を検出して2次元変位分布を求める. スペックル移動は変位前後のスペックル画像の強度分布を比較することによって検出できる. ここでは従来から行われている相関法, マッチング法をとり上げ, さらにスペックル移動の高速検出法として知られている空間フィルタ法を新たに2次元アレイに拡張する手法も比較検討する.

3.1 相関法

相関法では変位前のスペックル画像 $I_1(X, Y)$ を基準とし, 変位を求めようとする状態でのスペックル画像 $I_2(X, Y)$ との相互相関関数を計算し, 相関ピークの位置からスペックル移動を求める. 2次元の相互相関関数は次式のように定義される. このときの積分領域には十分な数のスペックルが含まれるものとする.

$$R_{12}(u, v) = \iint I_1(X, Y) I_2(X+u, Y+v) dX dY \quad (4)$$

もしこの相互相関関数に明瞭なピークが生ずれば, そのピーク位置(u_0, v_0)が積分領域中でのスペックル移動ベクトルを表す. ただし, 相互相関のピークが明瞭に生ずるためには, 積分領域に対応する物体領域内の変位がほぼ一様であることが必要である. 式(4)で $I_2(X, Y)$ を

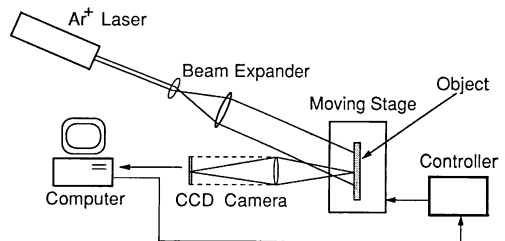


Fig. 2 Experimental setup for the measurement of in-plane displacement.

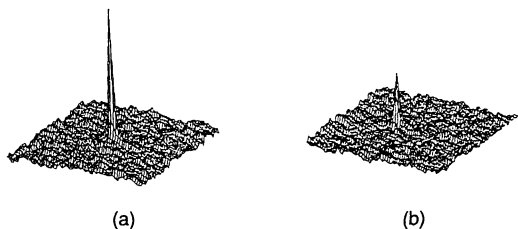


Fig. 3 Examples of 2-D correlation functions. (a) Autocorrelation, (b) Cross-correlation.

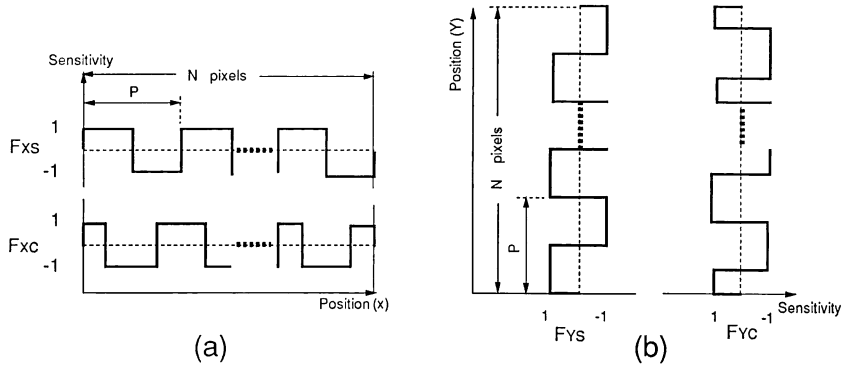


Fig. 4 Spatial filters for detecting the x -direction movement (a) and the y -direction movement (b).

$I_1(X, Y)$ に置換すると 2 次元自己相関関数になり, そのピークは常に $(u=0, v=0)$ の位置に生ずる. Fig. 3 にスペックル画像の 2 次元相関関数の例を示す.

電子式相関法には上式の 2 次元相互相関関数の定義に従って相関関数を求める方法⁴⁾(直接法) と極性相関法, FFT 相関法などがある. 極性相関法⁶⁾ではスペックル画像のコントラストが高いことを利用し, 次式のように領域内の平均スペックル強度値 (I_{AVE}) をしきい値とし, スペックル強度を +1 か -1 に変換して相関関数を求める.

$$B(X, Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(X, Y) \geq I_{AVE} \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5a)$$

$$I_{AVE} = \sum_x \sum_y I(X, Y) / W \quad (5b)$$

ここで, W はしきい値を決める領域に含まれる画素数である.

FFT 相関法では相互相関関数の計算時間を短縮するため, 次式のように移動前後のスペックル画像に対して 2 次元フーリエ変換を行い, 相関関数を求める.

$$R_{12}(u, v) = F^{-1} \{ \hat{I}_1(\xi, \eta) \hat{I}_2^*(\xi, \eta) \} \quad (6a)$$

ただし, $\hat{I}(\xi, \eta)$ は $I(X, Y)$ のフーリエ変換を示し,

$$\begin{aligned} \hat{I}(\xi, \eta) &= F \{ I(X, Y) \} \\ &= \iint I(X, Y) \exp[i2\pi(\xi X + \eta Y)] dX dY \end{aligned} \quad (6b)$$

また, 逆フーリエ変換によってもとに戻る.

$$\begin{aligned} I(X, Y) &= F^{-1} \{ \hat{I}(\xi, \eta) \} \\ &= \iint \hat{I}(\xi, \eta) \exp[-i2\pi(\xi X + \eta Y)] d\xi d\eta \end{aligned} \quad (6c)$$

3.2 マッチング法

マッチング法⁷⁾では次式のように相関法と同じくずらした画像間の差分の 2 乗和を求め, それらが最小になる位置からスペックル移動を検出する. 差分の 2 乗和の代

わりに差分の絶対値和を求めてもよい.

$$\begin{aligned} S(u, v) &= \iint \{ I_1(X, Y) - I_2(X+u, Y+v) \}^2 dX dY \\ &= R_{11}(0, 0) + R_{22}(0, 0) - 2R_{12}(u, v) \end{aligned} \quad (7)$$

したがってマッチング法は基本的には相関法と同じである.

3.3 空間フィルター法

空間フィルター法^{8,9)}は格子状の空間フィルターの上をパターンが移動するとき, 全透過光量が移動に対して周期的に変わることを利用する. 楕形の構造をした検出器も同じ機能を有する. これらはいずれも楕パターン周期に対応する空間周波数成分の動きを光電出力として抽出する機能を持つ. 従来の空間フィルターはスペックルの様な移動の検出にだけ用いられていたが, われわれは次のようにして移動分布の検出を試みる. すなわち X, Y 方向の画像信号に対してコンピュータ内で構成した Fig. 4 に示すようなフィルターを適用し, スペックル移動成分を求める. F_{Xs}, F_{Ys} と F_{Xc}, F_{Yc} はそれぞれの間で互いに位置を 1/4 周期ずらすことによって周波数応答の位相を $\pi/2$ ずらしており, サイン関数とコサイン関数の関係にある. F_{Xs}, F_{Xc} は X 方向, F_{Ys}, F_{Yc} は Y 方向の移動を検出するためのフィルターで, 各々の周期は 4 画素で構成される. 2 次元スペックル移動の検出は次のように行う.

(1) 次式のように変位前後の画像 $I_1(X, Y), I_2(X, Y)$ の各ラインに対して X 方向検出用のフィルターを適用し, サイン成分 $S_i(Y)$ とコサイン成分 $C_i(Y)$ を求める.

$$S_i(Y) = \int I_i(X, Y) F_{Xs} dX \quad (i=1, 2) \quad (8a)$$

$$C_i(Y) = \int I_i(X, Y) F_{Xc} dX \quad (i=1, 2) \quad (8b)$$

- (2) 得られた各ラインごとの $S_i(Y)$ と $C_i(Y)$ の比の逆正接から、変位前後の画像の位相 $\phi_1(Y)$ と $\phi_2(Y)$ を求める。

$$\phi_i(Y) = \tan^{-1}(S_i(Y)/C_i(Y)) \quad (9)$$

- (3) 次式のように各ラインごとの変位前後の位相差と、それらの平均位相差 (ϕ_{ave}) を求める。

$$\phi_{ave} = \int \{\phi_2(Y) - \phi_1(Y)\} dY/N \quad (10)$$

ここで N はラインの数である。

- (4) 平均位相差と空間フィルタ検出器の周期 (P) から、次式のように X 方向のスペックル移動量を求める。

$$\text{スペックル移動量} = \phi_{ave} P / 2\pi \quad (11)$$

- (5) Y 方向検出用のフィルタの出力信号に対して同様な処理を行い、 Y 方向のスペックル移動量を求める。

空間フィルタ法の場合、処理が非常に簡単であるため、ハードウェア化が容易に実現できるし、画素以下の移動検出が自動的に行われる特徴がある。

4. 実験

4.1 スペックル画像の取り込み

Fig. 2 の光学系で、出力 1 W の Ar イオンレーザー光 ($\lambda: 514 \text{ nm}$) をビームエキスパンダーで広げて物体を照射する。CCD カメラの光軸は物体面に垂直にする。照射ビームは縦 30 mm、横 40 mm 程度の楕円形である。この中でカメラで撮像される部分は光学系の結像倍率に依存するが、縦 22×横 24 mm 程度の長方形領域である。平面物体 (厚紙、真鍮、銅) に、コンピュータによって制御されるステップ・モーター駆動により、面内の並進または回転 (1 ステップ $0.1 \mu\text{m}$ または 0.001 deg) を与える。まず移動前の物体から得られるスペックルを 512×480 画素、256 階調の画像としてコンピュータに取り込む。次に物体を微小移動させた後にもスペックル画像を取り込む。これらの画像を小ブロックに分割し、左上のブロックから右下のブロックまで順次処理を行う。なお、スペックル画像を取り込んだ後の処理は C 言語を用いてワークステーション (SUN, SPARC station IPX) 上で 1 ブロック単位で行う。

4.2 最適パラメータの検討

通常の観察条件でのスペックルの統計的性質は物体の表面粗さによらず光学系のみ依存し、光学系を適当に調節することによってスペックルの統計的な性質、特にその平均径を変えることができる。ここでは 2 次元測定

を行う準備段階として、測定結果に直接影響する各種のパラメータについて検討し、最も適した条件を見いだす。

4.2.1 ブロックサイズの検討

スペックルの移動を正しく求めるためには、1 ブロック内に十分な数のスペックルが含まれ、しかもその中で動きが一様になっていることが望ましい。しかし、変位に分布がある場合、ブロック内での動きが一様になるためには小さいブロックの方が都合がよいが、そうすると含まれるスペックルの数は少なくなり、統計平均の不足によって相関ピーク等の検出精度が低下することが予想される。そこで、適切なブロックサイズを調べるため、1 ブロックの画素数を 16×16 , 32×32 , 64×64 に変化させ、スペックルの移動分布を求めた。限界の場合、スペックルの平均径として $1.22 \lambda F(1+m)$ の値がよく使われている。ここで m は結像倍率、 F は結像系の F ナンバーである。 F が 22, m が 0.29 程度のとき、スペックル平均径は約 $18 \mu\text{m}$ となる。CCD カメラの画素ピッチは $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ であるため、1 ブロックに含まれるスペックルの数はそれぞれ約 130 個、520 個、2080 個となる。

Fig. 5 に (4) 式の相関定義に従って求めた物体全体のスペックル移動量と物体に与えた変位量から予想される移動量間の標準偏差を示す。同図 (a) は厚紙を $20 \mu\text{m}$ ずつ 9 回、面内平行移動したとき、(b) は 0.05 deg ず

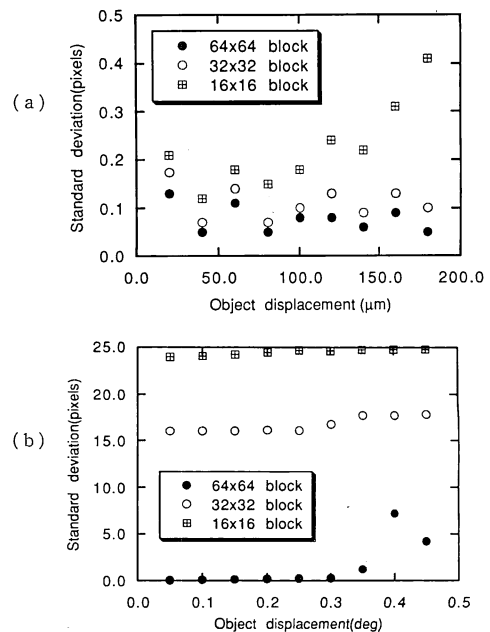


Fig. 5 Comparison of various block sizes.

つ9回、面内回転したときの結果である。面内平行移動の場合、ブロックの大きさが 32×32 画素以上ならば偏差は小さいが、 16×16 画素では物体の変位に伴い、偏差が大きくなる。回転の場合、 64×64 画素のブロックでは物体全面で良好な結果が得られ、偏差は小さい。しかし、 32×32 画素以下になると、変位量が小さくても検出された変位ベクトルのばらつきが大きいため回転しているかどうかの判別ができない。このように物体全面で変位量が異なる場合、1ブロック内に含まれるスペックルの数が少ないと、移動量を正確に検出することができない。他の手法においても同様な実験結果が得られたので、ブロックサイズとしては 64×64 画素を採用した。

4.2.2 絞りおよび入射光強度の検討

スペックル移動を正確に検出するためには、CCD カメラによってスペックルが解像される必要がある。限界のスペックルではFナンバーを調節することによってその大きさを変えることができる。例えば λ が 514 nm 、 m が 0.25 のとき、平均スペックル径が CCD カメラの画素ピッチ ($13 \mu\text{m}$) 以上になるためには、Fナンバーは 16 以上が必要となる。このときFナンバーを $4 \sim 22$

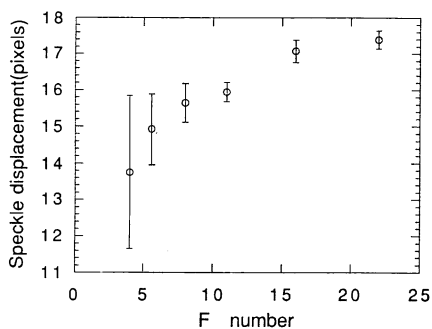


Fig. 6 Dependence of speckle displacement on the F number of the imaging lens.

に変えながら、真鍮を $900 \mu\text{m}$ 面内平行移動したときのスペックルの移動量を Fig. 6 に示す。スペックル径がカメラの画素ピッチ以下になるとスペックル移動量が小さく検出され、そのばらつきも大きくなっている。

物体を照射するレーザー光の影響を調べるため、照射光の強度を変えながらスペックル移動感度を求めたが、あまり変わらなかった。レーザー光に必要な強度は物体の反射率にも依存するが、スペックルパターンが明瞭に撮像される強度であれば特に問題はなかった。

4.3 各手法の比較

2次元変位分布の測定における処理時間はブロックの大きさや検索範囲（計算を行う横ずらし量の範囲）の設定などによって変化する。これについて検討を行った。

Fig. 7 にブロックサイズを 64×64 画素に固定し、検索範囲を基準画像の中心を原点として X, Y 方向に ± 4 画素から ± 32 画素に変えたときの相関法、マッチング法、空間フィルタ法の処理時間を示す。ここでは空間フィルタ法の処理時間を1として規格化している。空間フィルタ法の場合が最も速い。空間フィルタ法とFFT相関法以外は検索範囲の増加につれて処理時間も長くなる。Table 1 に厚紙を $45 \mu\text{m}$ 面内に平行移動

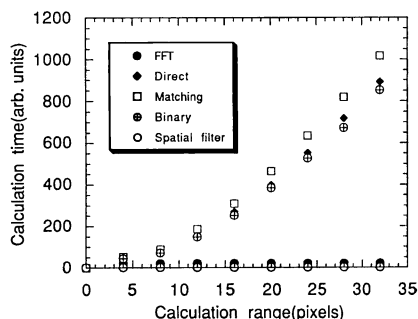


Fig. 7 Comparison of calculation time.

Table 1 Comparison of various methods.

Displacement	Direction	Standard deviation (pixels)				
		Correlation			Matching	Spatial filter
		FFT	Binary	Direct		
Translation 1	<i>x</i> -dir.	0.03	0.03	0.02	0.03	0.15
	<i>y</i> -dir.	0.02	0.02	0.02	0.02	0.14
Translation 2	<i>x</i> -dir.	0.08	0.10	0.11	0.10	0.29
	<i>y</i> -dir.	0.02	0.03	0.02	0.03	0.31
Rotation	<i>x</i> -dir.	0.23	1.43	0.22	0.22	0.28
	<i>y</i> -dir.	0.20	1.71	0.20	0.21	0.37

したとき (translation 1), 125 μm 斜め移動したとき (translation 2), 0.25 deg 回転したとき (rotation), 各手法によって得られたスペックル移動量の標準偏差を示す. 空間フィルタ法は高速であるが, 測定精度が低い. 他の手法は同程度の精度である. これらのことから FFT 相関法が2次元変位分布の測定に最も適していると考えられる.

5. FFT 相関法による2次元面内変位分布の検出

前節の実験結果からブロックサイズは 64×64 画素, 結像系の絞りと倍率はそれぞれ 16 以上, 0.3 程度を採用し, スペックル移動量を検出する. これから平均スペックル径および1ブロックに含まれるスペックルの平均個数を求めると $13 \sim 18 \mu\text{m}$ と 2000~4000 個程度になる.

5.1 内挿法による精度の向上

相関関数のピークの位置分解能は1画素であるが, 1画素以下の分解能を得るため, X, Y 断面について相関ピーク値とその前後の相関値を通過する放物線を求め, 各々の頂点位置としてスペックル移動成分を推定する¹⁰⁾. Fig. 8 は 30 μm ずつ9回, 真鍮を面内平行移動したときのスペックル移動量と相互相関ピーク値の変化である. スペックル移動量と物体変位量が比例し, 黒丸 (スペックル移動量) に最小2乗法を用いて直線をあてはめたとき, 直線の傾きは 0.31 程度で結像倍率 (0.32) とほぼ一致している. ここで結像倍率は物体面に方眼紙を付けて, その像の寸法を測定して求めた.

Fig. 9(a)は厚紙を 5 μm ずつ9回, (b)は真鍮を 150 μm ずつ 29 回面内平行移動したものに対し, 変位前画像と最終変位後画像間を幾つかに分割し, 分割した画像間の移動量を積算することによって求めたスペック

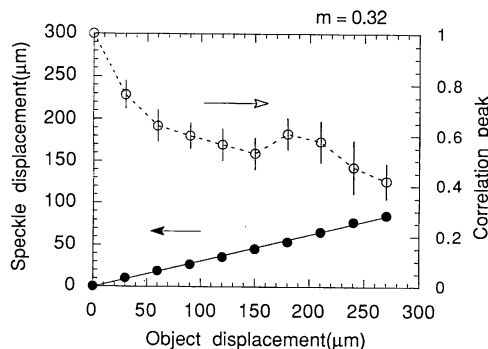
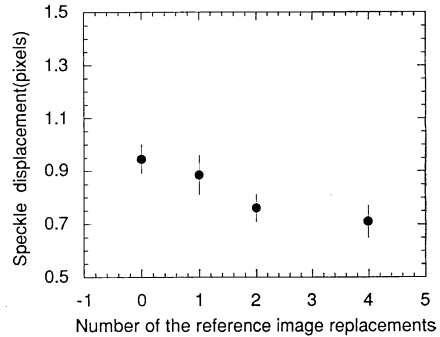
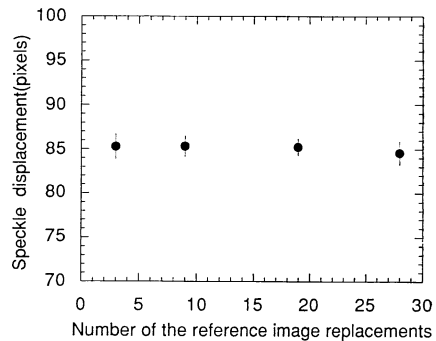


Fig. 8 Speckle displacement and decorrelation due to in-plane object translation.



(a)



(b)

Fig. 9 Dependence of total speckle displacements on the number of reference image replacements: (a) Translation (45 μm) and (b) Translation (4.35 mm).

ル移動量である. (a)での分割数はそれぞれ0, 1, 2, 4回で, 4回に分割すると測定値は予想移動量の75%程度になる. (b)での分割数はそれぞれ3, 9, 19, 28回で予想移動量と測定値がほぼ一致する. (a)のように測定する画像間でのスペックル移動量が小さい場合は, 分割数が多くなるほど実際の移動量より小さく検出される傾向が見られる. これは各ステップでのスペックル移動量が小さいため, 内挿の誤差が相対的に大きくなり, それが累積されるためであると考えられる.

5.2 測定範囲の拡大

Fig. 8に示すようにスペックル移動に伴って相関ピーク値は徐々に減少する. スペックル相間距離は有限であるため, 相関距離を越える変位の場合は, 相関ピークがノイズに埋れてスペックル移動は検出できない. 相関距離を越える大きな変位を検出するために, 本研究では物体が変位する途中の中間画像をとっておき, 相関距離を越えない小移動量を検出し, それらの小移動量を積算する方法を利用する.

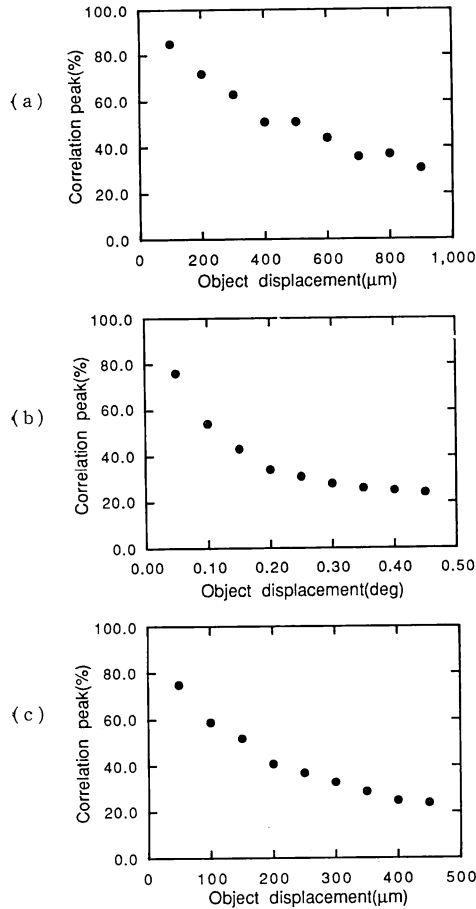


Fig. 10 Correlation peak values due to various in-plane object displacement. (a) Translation (900 μm), (b) Rotation (0.45 deg), (c) Extension (450 μm).

5.2.1 基準画像の更新

Fig. 10 に各種の面内変位に対して1枚の画像を構成する56ブロックの平均相関ピーク値(以後、平均相関ピーク値と呼ぶ)の変化を示す。同図(a)は100 μm ずつ9回、真鍮を面内平行移動したときで、物体が900 μm 変位するとスペックルの移動量は約17画素になる。(b)は0.05 deg ずつ9回、厚紙を面内回転したときで、物体が0.45 回転するとスペックルの移動量は最大で約2画素になる。(c)は真鍮を50 μm ずつ9回引っ張ったときで、物体を450 μm 引っ張るとスペックルの移動量は最大で約11画素になる。ここで縦軸の相関値は自己相関関数のピーク値を100にした場合の相互相関関数のピーク値である。(a)の場合は相関ピーク値の低下が小さいため、かなり大きな変位に対しても問題なくスペックル移動が検出される。しかし、(b)、(c)の場

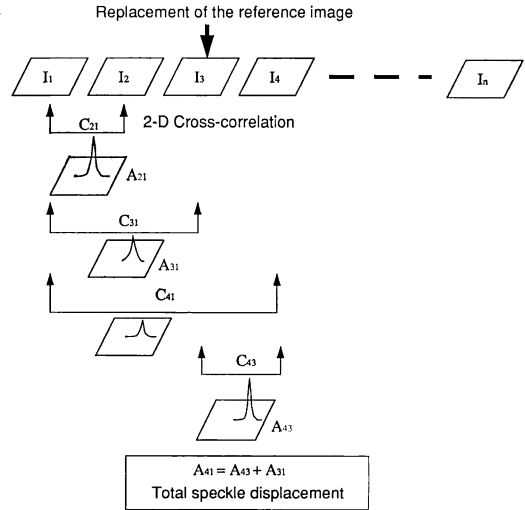


Fig. 11 Replacements of the reference images for extending the measurement range.

合は小さい変位に対しても相関ピーク値が急激に減少する。以上の実験結果を踏まえて **Fig. 11** に示すように平均相関ピーク値があるしきい値より小さくなったとき基準画像を更新する方法をとった。

まず第1フレームの画像 I_1 を基準画像とし、第2フレームの画像 I_2 との2次元相互相関関数を計算する。このとき平均相関ピーク値がしきい値より大きい場合は次のフレームの画像 I_3 と I_1 間の相関関数を計算する。これを繰り返すうち、もし I_4 と I_1 間の平均相関ピーク値がしきい値より小さくなら、基準画像を I_3 に更新し、スペックル移動起点をゼロに戻す。同時に I_1 から I_3 画像までの相対移動量を初期状態からのスペックル移動量に加算し、 I_3 までのスペックル移動量を求める。後は I_3 を新しい基準画像とし、 I_4 以後の画像に対して同様な処理を行う。このことによって測定可能なスペックル移動量はいくらかでも拡大される。

5.2.2 画像更新しきい値の設定

画像更新のしきい値は、各種の物体変位に対して測定誤差が大きくなった直後を調べることによって実験的に決めた。その一例を **Fig. 12** に示す。Fig. 12 は真鍮板(長さ110mm、幅55mm)の一端を固定し、他端を50 μm ずつ面内に引っ張りながら引っ張り端付近を画像として取り込み、求めたスペックルの移動量である。ここで横軸のブロックポジションは画像の左上のブロックを1、右下のブロックを56として順次表したものである。そして黒丸は物体の変位量が250 μm のとき、白い四角は200 μm のときのスペックルの移動量を表す。図に示すように物体の変位量が250 μm になると6個以上のブ

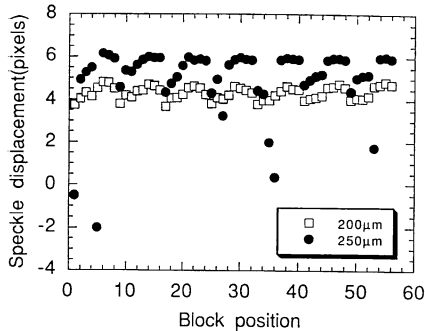


Fig. 12 Speckle displacement due to in-plane object extension.

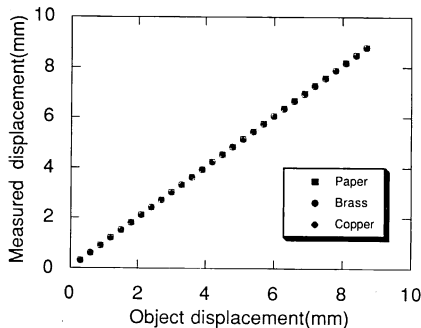


Fig. 13 Relationship between object translation and measured displacement.

ロック (1, 5, 27, 34, 35, 53 番) でスペックル移動量が減少し, 大きな誤差を生じている. これを抑えるためには変位量が $250 \mu\text{m}$ になった時点で基準画像を一つ前の画像に更新する必要がある. 変位量が $250 \mu\text{m}$ のときには, Fig. 10(c) に示すように平均相関ピーク値が自己相関ピーク値の 40% 以下になっている. また面内回転の場合でも同程度の相関ピーク値の低下で誤りが起こる場合が多かったので, 本研究では内挿による誤差の累積よりも相関ピークの低下による誤差を抑えることに重点をおき, 上の平均相関ピーク値より多少高い 40% を画像更新のしきい値として設定した.

Fig. 13 に $300 \mu\text{m}$ ずつ 29 回物体 (真鍮, 銅, 厚紙) を面内に平行移動したとき, スペックルの積算移動量から求めた変位量と実際の変位量を示す. 測定値と実際の変位量が良く一致しており, 大きな変位を検出する場合にも本手法が有効であることを確認した.

5.3 変位分布測定の結果と考察

Fig. 14 に面内変位する物体に対し, 本手法を用いて測定した 2 次元変位分布を示す. (a) は真鍮を $720 \mu\text{m}$ 面内平行移動したとき, (b) は厚紙を $225 \mu\text{m}$ 面内に斜

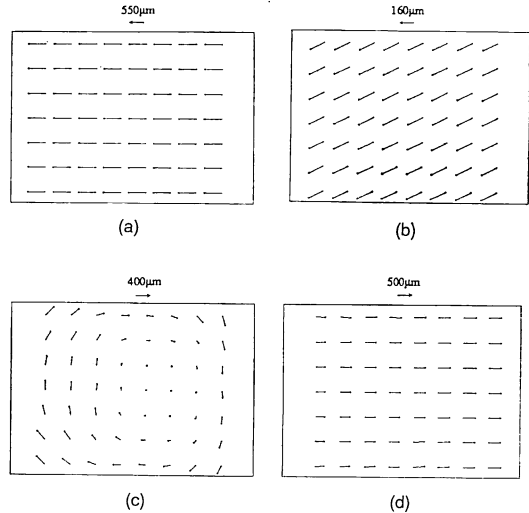


Fig. 14 The detected displacement distributions of a metal plate by the FFT correlation method. Each arrow represents in-plane displacement vector of the block. (a) Translation ($720 \mu\text{m}$), (b) Translation ($225 \mu\text{m}$), (c) Rotation (1.45 deg), (d) Extension ($450 \mu\text{m}$).

め移動したとき, (c) は厚紙を 1.45 deg 面内回転したとき, (d) は真鍮を $450 \mu\text{m}$ 右側に引っ張ったときの変位分布である. 矢印の方向がスペックルの移動方向, 矢印の長さがスペックルの移動量を表す. 画像 1 枚当りの処理時間は約 40 秒であった.

回転の場合, 物体の変位量が小さくてもスペックル変形の度合いが大きいため, 相関ピーク値がかなり低下する. このため, 画像更新の回数が多くなって測定精度が多少落ちる傾向がある.

一定のしきい値で全ブロックを同時に更新すると, ある位置では相関ピークが高い状態で更新されるし, ある位置では相関ピークが低い状態で更新され, 一部のブロックに測定エラーが生ずる可能性がある. このため, 画像更新をブロック単位で行い, スペックルの変形が大きいブロックでは画像更新の回数を増やし, そうでないブロックでは更新回数を減らす方法が考えられる.

今回は相関ピーク値の低下を画像更新の手がかりにしたが, 実際測定エラーが発生するのは, スペックル移動を表す相関値がノイズ成分より小さくなった場合である. このため, 例えば相関ピーク値とノイズ成分との相互関係から画像更新時期を判断する方法も考えられる.

画像処理技術を応用する変位計測法の測定限界は, 物体の変位速度と画像取り込み装置の処理速度によって決まる. 変位前後の画像間での変位量が大きければ, スペ

ックル移動やスペックル変形の度合も大きくなり測定は困難になる。このため、今回は断続的な物体変位を対象にした。連続的に変位する場合には高速に連続画像を取り込めばよい。

本手法の測定可能な最小移動量は約0.5画素であった。コンピュータ画像処理を利用する計測の場合、分解能は CCD カメラの結像倍率と画素ピッチに依存するが、高画素数の CCD カメラなどの開発によって改善が期待される。処理時間については、高速フーリエ変換のための専用 LSI チップの出現やコンピュータなどの急速な発展によって、大幅な短縮が期待される¹¹⁾。

6. 結 論

簡単な光学系と撮像装置、コンピュータを利用して試料表面に何らの加工も施さず、非接触で面内変位分布測定を行った。広げたレーザー・ビームで照射した物体を結像して得られるスペックル画像を小領域に分割し、各々の小領域について変位測定を行った。空間フィルタ法の場合は高速測定が可能であるが、測定精度に問題がある。相関法とマッチング法の場合、測定精度は高いが処理時間がかかる。このため、本研究では高速フーリエ変換によって2次元相互相関関数を計算する手法(FFT 相関法)を用い、処理時間を短縮した。この方法によって2次元変位分布を従来から使われているスペックル写真法に比べ、高速かつ簡便に得ることができた。そしてスペックル移動を画素以下の分解能で求めることと、基準スペックル画像を更新することにより、精度良く大きなスペックル移動を検出することができた。

測定光学系の絞りはスペックルの平均径がカメラの画素ピッチ以上になるように設定する必要がある。また相関関数を求める際、1ブロック中に含まれるスペックル

の数は物体変形の種類によるが、面内回転と引っ張りの場合には2000程度以上にする必要があった。

本手法の応用として考えられるのはひずみ、流速、変形などの2次元分布の高速測定である。今回は平面物体を対象に面内変位の検出を行ったが、凹凸がある表面や面外変位を含む3次元分布の測定への拡大について検討を行っていきたい。

文 献

- 1) 山口一郎：“スペックル応用計測の最近の進歩”，精密工学会誌，**57** (1991) 1948-1954.
- 2) N. Deng and I. Yamaguchi：“Automatic analysis of speckle photographs with extended range and improved accuracy,” *Appl. Opt.*, **29** (1990) 296-303.
- 3) I. Yamaguchi：“Advances in the laser speckle strain gauge,” *Opt. Eng.*, **27** (1988) 214-218.
- 4) W.H. Peters and W.F. Ranson：“Digital imaging techniques in experimental stress analysis,” *Opt. Eng.*, **21** (1982) 427-431.
- 5) N. Takai and T. Asakura：“Vectorial measurement of speckle displacement by the 2-D electronic correlation method,” *Appl. Opt.*, **24** (1985) 660-665.
- 6) 山口一郎，竹森民樹，小林幸一：“二軸レーザー・スペックルひずみ計”，非破壊検査，**39** (1990) 682-686.
- 7) Z.H. He, M.A. Sutton, W.F. Ranson and W.H. Peters：“Two-dimensional fluid-velocity measurements by use of digital-speckle correlation techniques,” *Exp. Mech.*, **24** (1984) 117-121.
- 8) T. Asakura and N. Takai：“Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the diffuse object,” *Appl. Phys.*, **25** (1981) 179-194.
- 9) 長山秀徳，岡本隆之，山口一郎：“適応型空間フィルタ検出器と高分解能スペックル変位計への応用”，光学，**20** (1991) 530-537.
- 10) T. Takemori, K. Fujita and I. Yamaguchi：“Resolution improvement in speckle displacement and strain sensor by correlation interpolation,” *Proc. SPIE*, **1553** (1991) 137-148.
- 11) 武田光夫：“干渉計測の自動化と高精度化のための縮画像解析”，第8回光波センシング技術研究会論文集 (1991) pp. 81-88.