

## 電子カメラによるスペックル相関画像計測

松本和也\*\*・佐々木康雄\*\*\*・南條基\*

### Speckle Correlation Interferometry by Electronic Camera

Kazuya Matumoto, Yasuo Sasaki and Motoi Nanjo

#### abstract

Scattered laser light from a rough surface forms speckle patterns due to random interferences of the light from randomly oriented surface elements. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is a measurement tool to analyze deformations or displacements without giving any disturbances to the objects. This report gives a brief review of ESPI and some experimental data, processing of the patterns, and their analyses regarding the speckle patterns taken by an electronic CCD camera.

#### 1. はじめに

光を使った計測には種々の次のような特徴を持っている。即ち、1) 対象物と非接触に計測できる、2) 対象物に非破壊的である、3) 電磁界雑音、放電雑音の影響が小さい、4) 多種の対象物や状態への対応が出来る、4) 高精度で高分解能であり、波長のオーダーでの計測ができる、5) 極限的な状態への計測手段を提供する、6) システム化や複合化に優れていて、計算機との整合性に優れている、7) 実時間計測への発展が期待できる、8) 小型化や軽量化への発展が期待できる、9) 周囲の振動の影響を受けやすい 等である。これらは、レーザー光の強度や位相に情報を載せて計測する。強度に情報を載せる代表的なものとしては、個別粒子からの光散乱強度やその空間的分布から、対象粒子のサイズや粒子径解析、粒子濃度の分析があり、また、他方、光波干渉即ちインターフェログラムとして光の位相に対象物の形状や微小な位置変化などの情報をのせて抽出される。この時、対象物体の面形状が粗い時には面を構成する各面素からの散乱光のランダムな干渉パターンが形成されて、粒状のぎらぎらしたランダムなパターン即ちスペックルパターンが得られる。スペックルパターンを利用して、対象物体の位置変化、形状変化などの計測に関する研究は多く報告されている。<sup>(1)(2)(3)</sup> 干渉のパターンの計測に感光フィルムの現像や読取と言った操作を省く事ができて、且つ進歩が著しく、また簡単な利用が可能といった特徴を持つ、CCD 電子カメラを活用したスペックル干渉画像計測、(Electronic Speckle Pattern Interferometry)<sup>(4)</sup> について報告する。

---

\* 電気工学科 \*\* 電気工学専攻大学院生 \*\*\* 電気工学科4年生

## 2 スペックル干渉画像計測の原理と特徴<sup>(5)(6)</sup>

### 2.1 スペックルの干渉と崩れ

スペックルパターンは物体表面上の各点からの散乱光が、観測面に到達する距離の変化に伴ってランダムな位相を持って干渉することによるパターンである。従って、対象物体表面に変形や変位がなされたために生じたこの物体面からの光散乱によるスペックルパターンと、対象物体表面に変形や変位がなされなかった時の物体面からの光散乱によるスペックルパターンとの間に、相関がある場合には、物体表面の変位や変形の情報を含んでいる。E S P Iの原理はこれらの両者スペックルパターンを電子カメラで捕らえてそれらの相関を利用することにある。本論文で採用した光学系のように2つの方向からレーザー光を対象物体に照射し面から散乱されたスペックル像をレンズによってCCD電子カメラで捉える方法についてのスペックルの像は次ぎのように記述できる。今、一つの光ビームを添え字r、残りの光ビームを添え字qを付けて表し示し、対象物体の変形や変位が生ずる前において散乱光によるビームを添え字1、変形や変位が生じて得られる散乱光のビームを添え字2で表すことにする。スペックルを生ずる干渉する2つの光ビームの波面を $U_r$ 及び $U_q$ とするとこれらの波によってカメラによって捉える光の強度Iは次のように表される。

$$\begin{aligned} I &= |U_r + U_q|^2 = |U_r U_r^*| + |U_q U_q^*| + |U_r U_q^*| + |U_r^* U_q| \\ &= I_r + I_q + |U_r U_q^*| + |U_r^* U_q| \end{aligned} \quad (1)$$

変形や変位の前後において電子カメラによって捉えられた光強度は $I_1$ と $I_2$ であり、両者の平均相関フリンジパターンは次ぎの強度の集合平均によって決まると考えて良い。

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = \langle I_1^2 \rangle + \langle I_2^2 \rangle - 2\langle I_1 I_2 \rangle \quad (2)$$

$U_r$ と $U_q$ の間には相互に統計的に独立であって相関がないが、 $U_r$ 或いは $U_q$ は何れか1つはスペックルを生じさせるコヒーレンスを持つものとするれば、

$\langle I_{r1} \rangle = \langle I_{r2} \rangle = \langle I_r \rangle$ 、及び、 $\langle I_{q1} \rangle = \langle I_{q2} \rangle = \langle I_q \rangle$ 、である。さらに、次ぎの関係が得られる。

$$\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = \langle I_r \rangle + \langle I_q \rangle \quad (3)$$

$$\langle I_1^2 \rangle = \langle I_2^2 \rangle = \langle I_r^2 \rangle + \langle I_q^2 \rangle + 4\langle I_r \rangle \langle I_q \rangle \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \langle I_1 I_2 \rangle &= \langle I_{r1} I_{r2} \rangle + \langle I_{q1} I_{q2} \rangle + 2\langle I_r \rangle \langle I_q \rangle \\ &\quad + \langle U_{r1}^* U_{r2} \rangle \langle U_{q1} U_{q2}^* \rangle + \langle U_{r1} U_{r2}^* \rangle \langle U_{q1}^* U_{q2} \rangle \\ &= \langle I_{r1} I_{r2} \rangle + \langle I_{q1} I_{q2} \rangle + 2\langle I_r \rangle \langle I_q \rangle \\ &\quad + 2\text{Re}[\langle U_{r1}^* U_{r2} \rangle \langle U_{q1} U_{q2}^* \rangle] \end{aligned} \quad (5)$$

従って、表面の変形や変位の前後の間にスペックルパターンに崩れが全くなく相関性を完全に保持されている理想的な時には、表面の変形に伴って生じた $U_r$ や $U_q$ の位相変化を $\Delta\phi_r$ 、 $\Delta\phi_q$ で示すと

$$\begin{aligned} \langle I_1 I_2 \rangle &= \langle I_{r1} I_{r2} \rangle + \langle I_{q1} I_{q2} \rangle + 2\langle I_r \rangle \langle I_q \rangle \\ &\quad + 2\langle I_r \rangle \langle I_q \rangle \cos(\Delta\phi_r - \Delta\phi_q) \end{aligned} \quad (6)$$

なる関係が得られる。従って相関干渉縞は (2)、(4)、(6) から、

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 4 \langle I_r \rangle \langle I_q \rangle [1 - \cos(\Delta\phi_r - \Delta\phi_q)] \quad (7)$$

で与えられる鮮明さを有する。また、 $U_r$ 、 $U_s$ 共にスペックルパターンを生じているが、表面の変形の前後ではスペックルパターンに崩れが生じているとき、即ち、パターン相関性を失う場合次ぎのようになる。スペックルパターン像のランダム性についてスペックルの強度の統計的分布関数  $p(I) = (1/\langle I \rangle) \exp(-I/\langle I \rangle)$  の形で与えられるから、

$$\langle I_r^2 \rangle = 2 \langle I_r \rangle^2, \text{ 及び、} \langle I_q^2 \rangle = 2 \langle I_q \rangle^2 \quad (8)$$

の関係がある。従って、

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2 (\langle I_s \rangle + \langle I_q \rangle)^2 \quad (9)$$

で与えられる。この時には、一様にランダムなスペクル像となって相関干渉縞は得られないことになる。

## 2.2 スペックルのサイズと光学系

スペックルを観測する光学系として図のような系はイメージモードであるが、有限な大きさの開口系によってスペックルの大きさが決まる。即ち、照射するレーザ光の波長を $\lambda$ 、レンズの焦点距離を $f$ 、開口径の直径を $d$ 、結像系における倍率を $M$ とすれば、スペックルの平均的な大きさ $\langle \sigma_s \rangle$ は次式で表される。

$$\langle \sigma_s \rangle = 1.2 (1 + M) \lambda f / d \quad (10)$$

また、CCDカメラの結像点がレンズに張る角度を $\gamma$ とし、レンズと結像面との距離を $L$ とすれば、スペックルのサイズの空間周波数分布はゼロ周波数成分が最も多く、最大空間周波数 $\mu_s$ 、

$$\mu_s = d / \lambda L \quad (11)$$

で示される成分までを持つ。従って、この $\mu_s$ 成分までを電子カメラによって分解する必要があり、ほぼこれに等しい配置を選択することが求められる。図1(a)、図1(b)は、開口径によるスペックルパターンの大きさの変化を示す。



図1(a) 開口径 6mmのスペックル



図1(b) 開口径約 20mmのスペックル

3. 実験光学系と画像計測データ<sup>(4)(7)</sup>

図2に2ビーム照射の実験系のブロック図を示す。対象表面に2つの方向からビームを等しい入射角度でレーザー光を照射し結像レンズによって表面からの散乱スペックル像をCCDカメラによって捉える。この配置においては、レンズと対象表面とを結ぶ光軸Z方向と対象物体面に平行なY方向の変位に対してはスペックルは2つのビーム間で相関性をもつ変化を与えない。対象物体のX方向の変位に対しては2つのビームは変位の前後において相関性のあるスペックルパターンを与える。

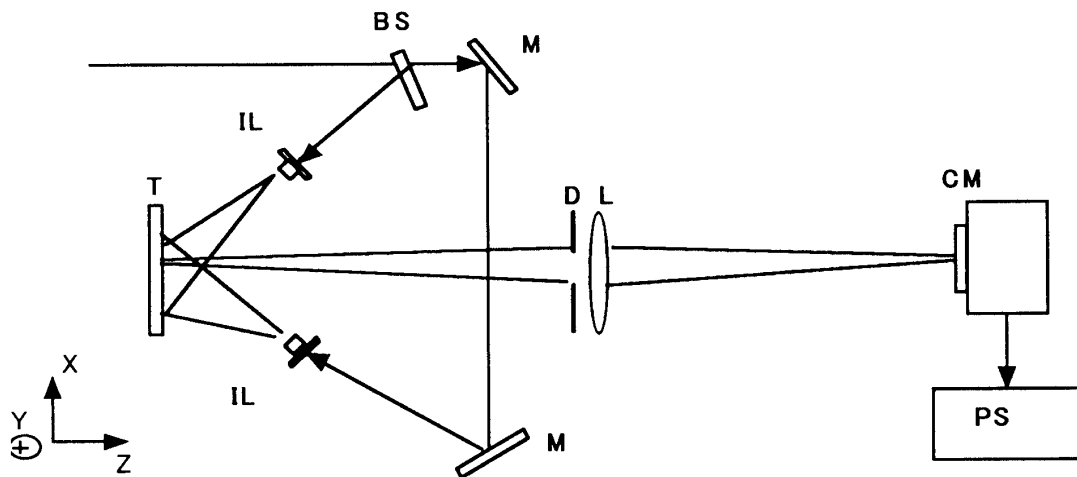


図2 スペックル画像計測系

T: 対象物体、BS: ビームスプリッター、M: 反射鏡、IL: 照射レンズ  
D: 絞り、L: 結像レンズ、CM: CCDカメラ、PS: パーソナル計算機

測定に用いたCCDカメラは天文観測用のカメラで、冷却機構を持っているが、暗雑音(20℃)ダークノイズレベルは $1e/5\text{sec}$ 程度である。次ぎのような特性である。CCDサイズは768個 $\times$ 512個のエレメントからなり、各ピクセルのサイズは約 $9\mu\text{m}$ 平方である。1ピクセルのダイナミックレンジは16ビットの分解能、即ち65,536輝度レベルに分解する。従って1つのイメージを記憶するのに必要な容量は約768キロバイトである。また、1ピクセルの読み取り時間は約 $10\mu\text{s}$ かかる。従って、全ピクセルについては約4秒程度となる。付属されたシャッターによって、最小露出時間は $10\text{ms}$ の設定が出来る。カメラから計算機への画像の転送にはSCSI接続にて行っている。画像ファイルの形式は科学的なデータを相互に受け渡しする形式として良く用いられるFITS(Flexible Image Transport System)ファイルである。<sup>(8)</sup>このファイルは80行からなる2880バイトの簡単なテキスト形式のヘッダー部があり、計測条件等のデータを記述するためのものであり、文字数は必ず空白部で満たす必要がある。これに続いて、CCD出力である768 $\times$ 512個の正值のAD変換出力画像データを16ビットの2の補数のバイナリーデータとしてファイル内部では表現され、転送される形式を持っている。転送されたデータはパーソナル計算機によって計算処理する。

#### 4. 面内変位に対するスペックル相関干渉

2章において記述した記号に従えば、変位の図2の計測系では、変位の前にrビーム及びqビームと両方のビームを同時に照射した時のスペックル画像を計測し、変位を与えた後に同様な画像データを計測する。この時に、面に照射する両方のビームの入射角度が等しくこれを $\theta$ とすれば、面のX方向の変位を $\delta$ とすると、スペックルの位相の変化は次ぎのような関係を持つ時に、

$$n\lambda = 2\delta \sin \theta \quad (12)$$

フリンジが現れる。

図2に示される装置において対象物体にZ軸方向の回転中心を設け、差動マイクロメータによって微小な回転を与える。この時、対象物体のX軸方向の変位は回転中心からY軸の距離にほぼ比例した変位が与えられることになる。変位の前の両方向のビームに対するスペックル像を $P_1$ 、変位の後のそれを $P_2$ とした時のスペックル像を撮像しする。これらのデータから、まず暗雑音やCCD固有ノイズを差し引き、引き続いて、両者の差を計算する。これらの計算は簡単なプログラムで処理できるから高速で行える。得られたスペックル干渉画像を図3に示す。上述のようなスペックル干渉フリンジ像が得られていることが分る。

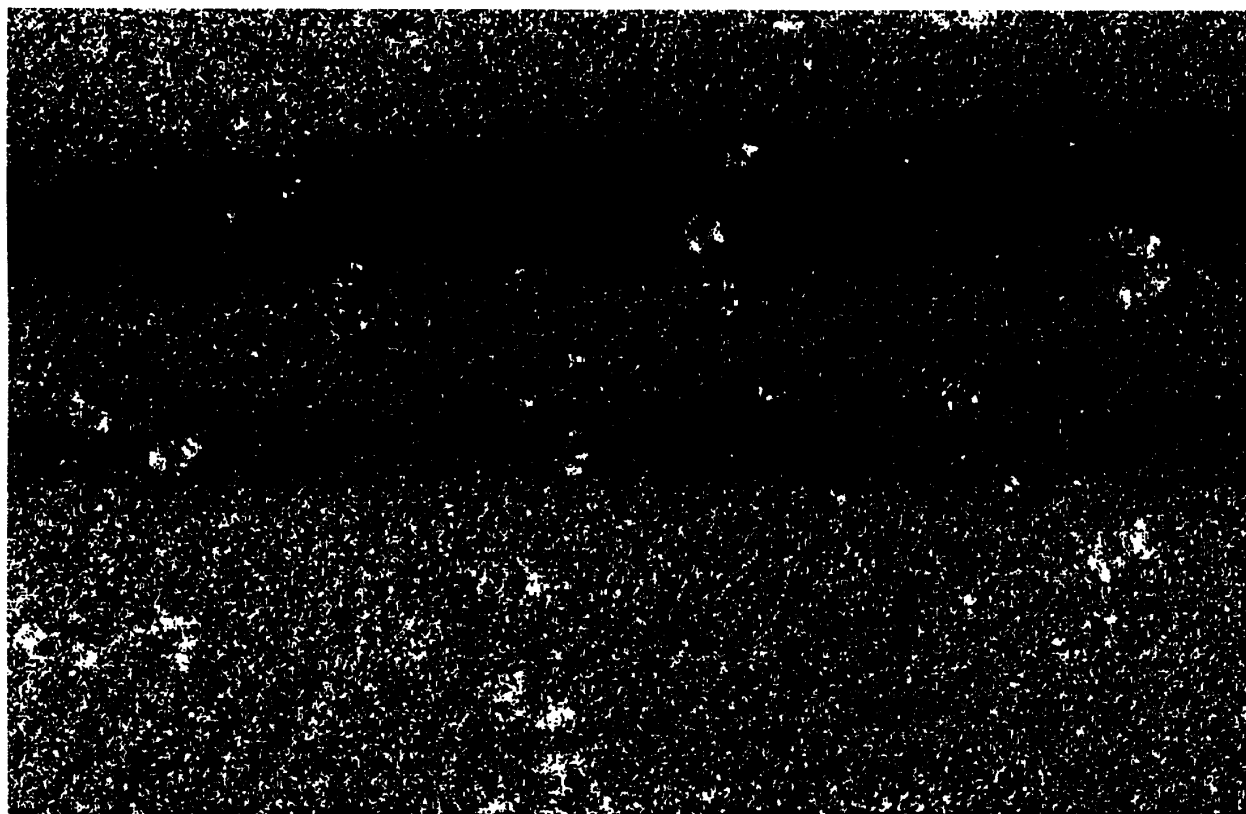


図3 スペックル相関干渉パターン

5. 検討及び考察

前節において面内変位を示すスペックル干渉画像が得られることが示された。しかし、スペックルの干渉画像としては必ずしも十分明確な干渉画像とは言えない段階である。測定対象の均一度や測定条件の吟味のために、次ぎのような検討を行った。今、ピクセル位置  $(X_i, Y_j)$  のスペックル輝度値を  $P(X_i, Y_j)$  としたときに、

$$C(m,l) = \frac{1}{N^2} \sum_{Y=Y_0}^{Y=Y_0+N} \sum_{X=X_0}^{X=X_0+N} P(X, Y)P(X+m, Y+l) \quad (13)$$

で示される画像の自己相関関数を計算した。その結果を図に示す。

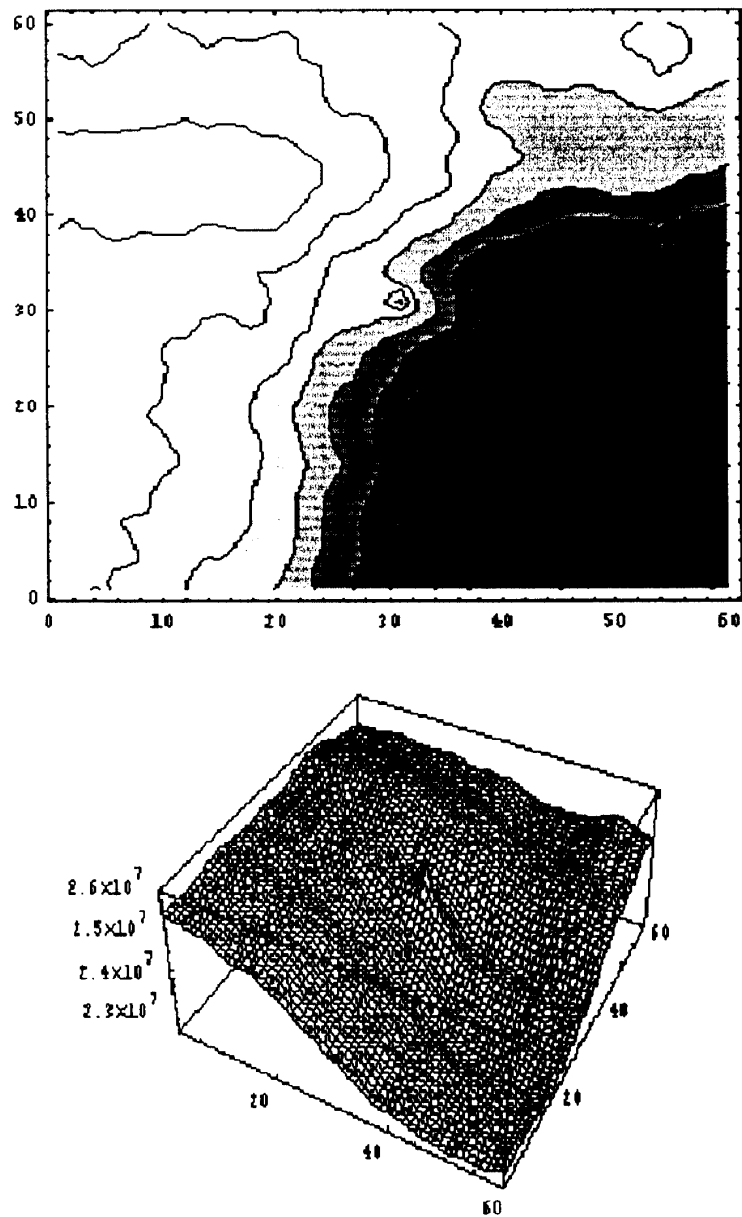


図4 自己相関関数のコントロールマップ (上) とプロット図 (下)

同図において上が  $C(m,l)$  のコンツールマップで下が 3 次元的にプロットした図である。中央部は  $C(0,0)$  を示すが、周辺より高い値を持ち、 $m$ 、 $l$  が大きくなるにつれて小さくなっていることが分かる。しかしながらその値の周辺値との変化は急峻でないことが伺える。CCD の画素のサイズとスペックルサイズとがほぼ同じ大きさであること、また、対象物体の反射率や輝度値の非均一性が関係していると思われる。

## 6. おわりに

CCD 電子カメラを用いたスペックル画像干渉計測について微小変位の計測の可能なデュアルビーム相関干渉パターンについて述べた。画像がデジタル化されているので計算機を用いての処理には、処理用のプログラム開発に今後進める必要があるものの、計算機の大容量高速化にともなって、CCD カメラは整合性が優れていることが示された。現段階において得られた干渉パターンの鮮明さと分解能に付いては、スペックル画像の相関度の変化などから推測して、光学的な改善が必要であると考えられる。スペックル干渉画像計測は物体表面の劣化<sup>(9)(10)</sup>やその予測など、また、内面の歪を予測するなどの提案<sup>(11)</sup>がなされており、非破壊的な計測手段として今後さらに発展するものと思われる。

## 参考文献

- 1 A.E.Ennos :Speckle Interferometry in Progress in Optics XVI (eds by E.Wolf, North-Holland,1978)
- 2) P.K.Rastogi: Techniques of Displacement and Deformation Measurements in Speckle Metrology (ed. by R.S.Sirohi, Speckle Metrology, Marcel Dekker Inc.,1993)
- 3) 山下、北島：耐環境スペックル計測：先端レーザーテクノロジー（レーザー学会編、日経技術図書、II レーザー工業計測、1992)
- 4) O.J.Lorkberg :Recent Developments in Video Speckle Interferometry (ed. by R.S.Sirohi, Speckle Metrology, Marcel Dekker Inc. ,1993)
- 5) M.O.Peterson:J.Opt.Soc.Am.A 8 1082(1991)
- 6) I.Yamaguchi:Theory and Applications of Speckle Displacement and Decorrelation (ed. by R.S.Sirohi, Speckle Metrology, Marcel Dekker Inc., 1993)
- 7) S.Yoshida, et al :Optics Letters 20 755(1995)
- 8) 例えば:A Brief Introduction to FITS ([http://fits.gsfc.nasa.gov/fits\\_intro.html](http://fits.gsfc.nasa.gov/fits_intro.html))
- 9) D.Paoletti et al :Applied Opt. 32 6236 (1993)
- 10) G .S. Spagnolo et al: Applied Opt. 36 8358 (1997)
- 11) 吉田： レーザー研究 26 668 (1998)

(平成11年12月8日受理)