

研究速報**電子的に構成したスペックルグラムを用いた
面内変位の測定**

岡田 英史・福岡 豊・梅谷 順・榎本 宏・南谷 晴之

慶応義塾大学理工学部電気工学科 〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1

(1989年9月20日受理)

**In-Plane Displacement Measurement by Using
Electronic Specklegram**Eiji OKADA, Yutaka FUKUOKA, Jun UMETANI, Hiroshi ENOMOTO
and Haruyuki MINAMITANIDepartment of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology,
Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223

This study describes a quasi-real time method for the measurement of in-plane displacement of an object. Two speckle patterns before and after the displacement of the object surface are taken by a TV camera and added in an image processor. The added speckle image is displayed on a liquid crystal television (electronic specklegram), which is equivalent to a negative film in speckle photography. Young's fringes can be observed from the electronic specklegram in a Fourier optical system, so the in-plane displacement of the object can be measured.

1. はじめに

近年、二次元空間における変位、速度の分布測定、いわゆる定量的可視化法の確立が強く求められている。この要望に対するアプローチは主として次の二つに大別される。一つはレーザー・ドップラ流速計¹⁾のような一点時系列測定に重点がおかれていた測定技術を、空間速度分布の測定に応用したもので、ビームスキニングLDV²⁾、レーザードップラ・イメージング等³⁾の手法が開発されている。他方は、従来は定性的に行っていた可視化法に画像処理を適用することによって定量的な測定を行う方法である^{4),5)}。しかし、前者は光学系が複雑化するために取扱いが煩雑化すると共に高コストになること、後者は膨大な画像情報から変位や速度の目的とする情報を抽出するには画素間の積和演算が必要であり、演算量が多くなるため処理に時間がかかることなどの問題点があり、いまだ決定的な方法は見いだされていない。

一方、従来から利用されている定量的可視化の手法にスペックル写真法⁶⁾がある。これは固体表面のスペック

ルパターンの変化を二重露光写真に記録し、その写真ネガ(スペックルグラム)を光学的に処理することによって定量的な変位量の測定を行う手法である。さらに、特定の散乱面を有しない流体においても、散乱粒子を混入した流体をシート状のレーザー光で照射して可視化することにより、同様に測定を行うことが可能である⁷⁾。これらのスペックル写真法の原理を基礎とした測定は、二次元的な変位分布を定量的に可視化できる有効な技術と考えられているが、前述した方法に比べると、現状ではいまだ実用的な測定法として広く用いられるまでに至っていない。その理由の一つとして、写真技術に立脚した方法であるため実時間的な測定や、時系列的な測定が困難であるという点が挙げられる。

しかし、この方法は光学系が簡単であることや、スペックルグラムからの変位量の検出は光学的な並列処理で行うため、対象の情報量に演算速度が依存しないなどの優れた特徴をもっている。そのため、スペックルグラムの機能を実時間素子で実現する試みが積極的に行われてきている。たとえば、スペックルを利用した振動計測で

は、厳密に二重露光写真を撮影しなくても時間平均法によってスペックルパターンを振動周期より長時間露光することによってスペックルグラムを作製することができ、撮影条件が変位測定や速度測定に比べて厳密でない⁸⁾。そこで、時間平均スペックルパターンを実時間光記録素子である液晶光バルブ、PROM またはサーモプラスチック写真材料などに光書込みして記録し、実時間的に振動を解析する方法も提案されている^{9,10)}。また、空間光変調器の一つである液晶テレビは比較的取扱いが容易で、かつ電子的な書込みが可能である。この性質を利用して、撮像を電子的に行い液晶テレビを用いた光演算によって目的とする情報を得る。光画像計測の基礎的研究も試みられている¹¹⁾。

本報では、液晶テレビと画像処理技術を融合して利用することによりスペックルグラムを電子的に構成し、粗面の面内変位を測定したので、その装置の概要と実験結果について報告する。

2. 電子的スペックルグラムを用いた変位測定の装置と方法

スペックルとは物体粗面にレーザーなどのコヒーレント光を照射したときに観測されるコントラストの高い不規則な斑点状の模様である。スペックルパターンを適切な光学系で観測すると物体の移動に対応した運動することから、スペックルパターンを物体につけられたマークとして検出して、物体の変位や速度を検出することが可能となる¹²⁾。

スペックル写真法はその代表的な手法の一つであり、スペックルパターンの変化を二重露光写真(スペックルグラム)に記録して、得られたスペックルグラムを光学処理することによって、スペックルの変位量を定量的に検出する。

Fig. 1 にスペックルグラムを写真フィルムを用いずに実時間的に構成し、スペックル写真法と同様の原理に基づいて変位量を測定する光学系を示す。He-Ne レーザー (15 mW) をレンズで拡大して対象表面を照射する。このとき観測される像界のスペックルパターンをテレビカメラで撮影して、画像処理装置のフレームメモリー上に記録する。対象が変化した後、再びスペックルパターンを撮影する。撮影した画像は、変位前の画像と加算され、新たな加算画像をフレームメモリーに書き込む。フレームメモリー上の加算画像データは 640×110 の菱形画素 (対角線長 207 μm×526 μm, 消光比 10) で構成された液晶テレビに出力されており、このとき液晶

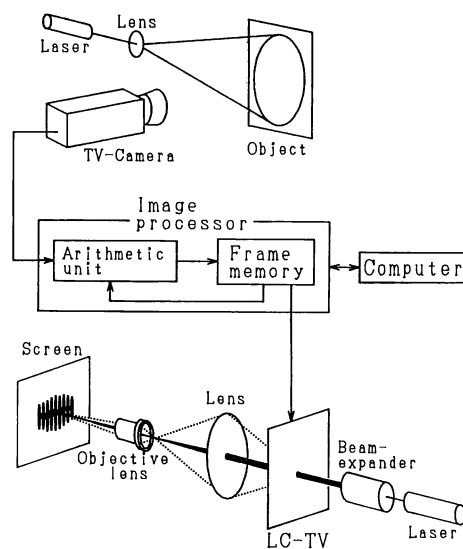


Fig. 1 Optical system for in-plane displacement measurement using the electronic specklegram.

テレビ(電子的スペックルグラム)に表示されているパターンは二重露光写真と等価になっている。よって、この電子的スペックルグラムを利用して、スペックル写真法と同様の手法で観測領域の二次元局所変位分布や等変位線の可視化が可能となる。

ここでは、スペックルグラムの測定部位を局所的にレーザー光で照射して、観測されるヤング縞から変位を測定する配置で光学系を構成した。ビームエキスパンダでビーム径を 8 mm に拡大したレーザー光 (He-Ne, 15 mW) で電子的スペックルグラムを局所的に照射し、回折像を焦点距離 150 mm のレンズでいったん結像した後、4 倍の対物レンズを使用してヤング縞を拡大して観測する。このとき観測されるヤング縞の縞間隔 p は、

$$p = f\lambda / M\delta d$$

ここで、 f は回折像を観測する光学系におけるレンズの焦点距離、 λ はレーザー光の波長、 M は電子的スペックルグラムの撮影倍率、 δd は対象の変位量を表しており、縞の方向は対象の変位方向に対して垂直に生じる。また、ヤング縞の実時間解析についてはスペックル写真法における豊富な解析手法^{13,14)}をそのまま利用することができる。

3. 変位測定の実験結果および検討

電子的スペックルグラムは液晶テレビの空間光変調機能を利用したものであるから、その最小単位である画素の影響を無視することはできない。そこで、まず濃度レ

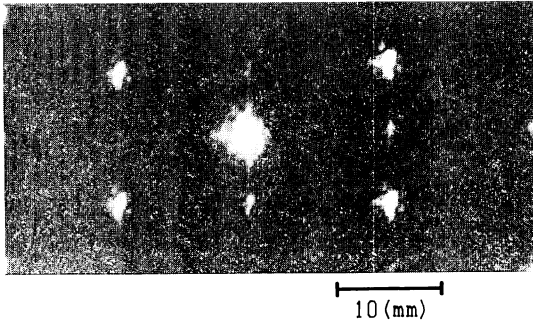


Fig. 2 Diffraction pattern produced by pixel structure of LC-TV.

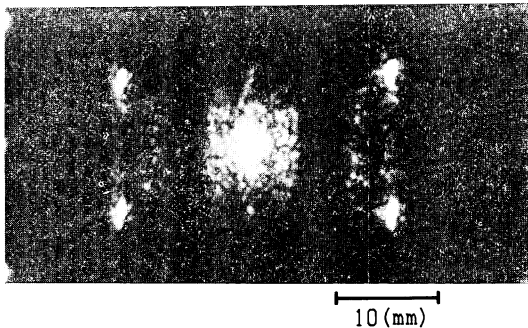


Fig. 3 Young's fringe observed from the electronic specklegram, where displacement of the object was $150 \mu\text{m}$.

ベルを一定にした液晶テレビにレーザー光を照射して、画素のみによって生じる回折パターンを観測した。Fig. 2 は、その結果で、菱形をした画素によって生じた周期的な明暗パターンが観測されている。このことは、電子のスペックルグラムを使用した場合、ヤング縞は必ずこの画素による回折パターンに重畳した形で観測されることを示している。

Fig. 3 は物体を水平に移動した場合の測定結果である。対象は表面を研磨したアルミ板で、2 画像間の変位量は $150 \mu\text{m}$ である。このとき、スペックルの平均径が液晶テレビの画素より十分大きくなるように絞りは $F/22$ に設定し、また対象の横変位のみを検出するためにピントはアルミ板表面に合わせた。写真には画素による回折パターンに重畳してヤングの干渉縞が観測されている。

Fig. 4 はヤング縞をテレビカメラで撮影し、縞に垂直な方向についての強度分布をとった結果である。画素の影響によって暗点が出現するため一部欠落している部分が見られるが、縞強度が周期的に変化していることがわかる。このことは Fig. 4 のパターンをフーリエ変換した Fig. 5 を見るとより明確になる。ヤング縞の縞間

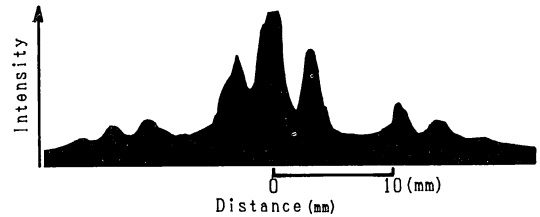


Fig. 4 Intensity distribution of the fringe pattern observed from the electronic specklegram, where displacement of the object was $150 \mu\text{m}$.

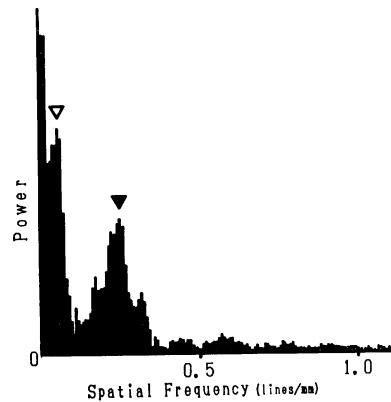


Fig. 5 Power distribution of Fourier spectrum of the Young's fringe pattern, where displacement of the object was $150 \mu\text{m}$.

隔に対応した空間周波数 (▼印) のところにスペクトルのピークが存在している。また、それにより低周波の部分には画素の回折パターンによるピーク (▽印) が見られる。

実験では $100 \sim 400 \mu\text{m}$ の変位量に対して理論値と一致したヤング縞の存在が観測されたが、変位量が $400 \mu\text{m}$ を越えるとヤング縞に重畳しているスペックルノイズの影響が大きく干渉縞の存在が不明確になった。これは、電子のスペックルグラムのレーザー照射領域に存在する、変位前後のスペックルパターンの共通領域の比率が変位量の増大とともに減少するためであると考えられる。変位量が大きい場合にも良好なヤング縞を観測するためには、電子のスペックルグラムのレーザー照射領域を大きくすればよいが、このとき照射領域中のスペックルの変位量は一様でなければならない。また、液晶テレビは写真フィルムと比較して解像度が低いいため、測定可能な変位量を大きく設定した場合、変位分布測定の空間分解能が低下してしまうことになる。この問題は画素数が多い高品位の液晶テレビを使用して電子のスペック

クルグラムを構成できれば解決することが可能である。空間分解能と応答速度の向上は、現在、液晶テレビの開発の上で重要課題とされており¹⁵⁾、この問題は早晩解消されることが期待できる。

一方、従来のスペックル写真法とは異なり、本法では画像情報を電子的に記録、加算しているため、電子的スペックルグラムでは撮影した画像に対して画像処理を施すことが可能になる。たとえば、従来のスペックル写真法では、撮影時の露光状態で決定されてしまったスペックルグラムのコントラストを、電子的スペックルグラムでは画像を加算する段階で濃度階調変換などによるコントラスト強調を施すことによって改善することが可能である。このことは、撮影時の光量の調節が不十分であっても、良好な状態で測定を行えることを示している。

4. あとがき

本研究では液晶テレビの空間光変調機能を利用してスペックルグラムを実時間で構成し、粗面の変位を測定する基礎実験を行った。この方法は、光学的測定技術であるスペックル写真法に、液晶テレビという電氣的に書込みが可能な空間光変調器を用いることによって電子的要素を付加し、実時間的測定を行うことを可能としている。現状では液晶テレビの画素数が少なく、画像の情報量が写真フィルムに比べ小さいことから、スペックル写真法と同様の空間分解能で測定を行うことは困難である。

一方、画像の情報量は増大する傾向が続いており、画像を直接処理する通常の方法では演算量が膨大化し、演算時間を短縮するためには画像情報の圧縮を迫られるのが必至である。その点、電子的スペックルグラムを利用した面内変位の測定法は、光学的並列処理によって画像そのものから目的とする変位情報のみをヤング縞という解析が容易なパターンとして検出することができる。このような光技術を電子技術とバランスよく融合させた画像処理法は、画像の情報量に関係なく実時間的に処理を行うことができるので、定量的可視化の有効な手法にな

りうるものと考えられる。

本研究は財団法人安藤研究所の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw: *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry* (Academic Press, 1976).
- 2) B. Chehroudi and R. L. Simpson: "A rapidly scanning laser Doppler anemometer," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **17** (1984) 131-136.
- 3) T. Yoshimura, H. Sakashita and N. Wakabayashi: "Real-time measurement of spatial velocity distribution with a laser Doppler imaging system," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2448-2452.
- 4) T. P. K. Chang, A. T. Watson and G. B. Tatterson: "Image processing of tracer particle motions as applied to mixing and turbulent flow— I, II," *Chem. Eng. Sci.*, **40** (1985) 269-285.
- 5) 奥野武俊: "流場計測技術と画像処理", *日本造船学会誌*, **716** (1989) 65-71.
- 6) E. Archbold and A. E. Ennos: "Displacement measurement from double-exposure laser photographs," *Opt. Acta*, **19** (1972) 253-271.
- 7) T. D. Dudder and P. G. Simpkins: "The development of scattered light speckle metrology," *Opt. Eng.*, **21** (1982) 396-399.
- 8) H. J. Tiziani: "Application of speckling for in-plane vibration analysis," *Opt. Acta*, **18** (1971) 891-902.
- 9) T. Takemori, S. Ueha and J. Tsujiuchi: "Real-time in-plane vibration measurements by speckle interferometry with the aid of liquid crystal light valve," *Opt. Commun.*, **32** (1980) 24-26.
- 10) S. Ueha, N. Kobayashi and J. Tsujiuchi: "Thermoplastic photographic material for vibration measurements by speckle photography," *Opt. Commun.*, **34** (1980) 340-344.
- 11) 滝沢國治, 會田田人, 岡田正勝: "液晶 TV を用いた画像の動きベクトル検出", *光学*, **18** (1989) 260-261.
- 12) 山口一郎: "スペックル応用計測技術と最近の動向", *計測と制御*, **21** (1982) 881-890.
- 13) G. H. Kaufmann: "On the numerical processing of speckle photograph fringes," *Opt. Laser Technol.*, **12** (1980) 207-209.
- 14) R. Erberk: "Fast image processing with a micro-computer applied to speckle photography," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3838-3841.
- 15) 間多 均: "液晶空間光変調器", *光学*, **18** (1989) 305-351.