

## 研究

干渉縞解析のためのデフォーカス処理を用いた  
ハイブリッド画像処理

森 邦彦\*・村田 和美\*\*

\* 北海道職業訓練短期大学校 〒047-02 小樽市銭函 3-190

\*\* 北海道大学工学部 〒060 札幌市北区北 13 西 8

(1987年10月16日受理)

Hybrid Image Processing by the Aid of Defocussing  
Technique for Interferogram Analysis

Kunihiko MORI\* and Kazumi MURATA\*\*

\* Hokkaido Polytechnique College,  
3-190, Zenibako, Otaru 047-02\*\* Faculty of Engineering, Hokkaido University,  
N13 W8, Kita-ku, Sapporo 060

Optical-digital image processing by the aid of defocussing technique is investigated for the analysis of interference fringes. Peaks of fringes are detected by this hybrid image processing with high speed. Moreover, the defocussing technique is effective for noise reduction of image.

## 1. はじめに

物体の形状や変位, その内部の屈折率分布などを精度よく計測する光波干渉法において, Mach-Zehnder 干渉計や Twyman-Green 干渉計などが使用される。測定しようとしている物体の情報は干渉縞の位相項に含まれており, これを解析することが重要であるが, 実際にはこの強度分布には写真処理の非線形性, および低周波の雑音である入射光量むらや光学素子の不均一性, 等により生じる成分も含まれている。これらは干渉縞強度分布のバイアスや変調度を不必要に変化させるもので, 位相測定の際の不要成分である。これら不要成分の分布が既知, あるいはそれらと位相項を分離できれば, その位相分布は一義的に求めることができる<sup>1)</sup>。しかしながら, 一般的にはこれら不要成分は未知量であるため, なんらかの方法で位相項と不要成分を分離しなければ位相分布を正確には求めることができない。

干渉縞強度分布から不要成分を分離して位相分布を厳密に求める処理法として, 現在では時間的周波数を導入するヘテロダイン干渉法<sup>2,3)</sup>, 空間的周波数を導入する

フーリエ変換法<sup>4,5)</sup>, 空間的位相検出法<sup>6,7)</sup>等が知られている。これらの処理法によれば位相分布をきわめて高い精度で求められることが報告されている。

一方, 従来から行なわれている干渉縞のピークの位置を解析する処理法では, ピークの位置を求め縞次数を決定することによって, その位置での位相を知ることができる。この方法によれば, 干渉縞の強度分布にバイアスや変調度の空間的変化がある場合でもピークが確認できれば問題ない。その原理から明らかなように, この方法は位相分布が波長単位よりも大きければ有効であるが, そうではない場合は縞の解析はできない。しかし, この方法は前述の不要成分を分離して位相分布を厳密に求める処理法に比較して, はるかに簡単であるという利点をもつ。さらに, 干渉計の参照光をわずかに傾けることにより空間的搬送波を導入し, 波長単位以下の計測を行なうことが可能となる。

干渉縞の位相分布を求めるには以上のような処理法があり, 電子計算機による高速処理も研究されているが, 2次元的な分布をもつ干渉縞画像のデータ量は非常に多いため, 高速処理を行なうにはなるべく簡単なアルゴリ

ズムを採用することが望ましく、一般的にはピーク検出法が最も適している。高速解析処理を目的としたピーク検出法が研究されているが<sup>8)</sup>、処理速度向上の手段の一つとして、画像の局所平均を光学的なデフォーカス処理により求め、干渉縞画像の最適バイナリー化を行なう方法も報告されている<sup>9)</sup>。

また干渉計測においては、近年その干渉縞を TV カメラ・光電検出管等に直接入力する方法が開発されているが、従来から最も普及し、容易な方法は干渉縞を写真にいったん記録する方法である。写真記録法によれば高速で移動する物体、あるいは物体の瞬間的な状態も測定できる。さらに、写真を媒体として処理がオフラインとなり、干渉縞を記録する場所とその解析を行なう場所とが離れていてもよいという利点がある。

われわれはピーク検出処理の簡便さ、デフォーカス処理を用いたハイブリッド画像処理の有効性、および写真記録による干渉縞解析の一般性に着目し、干渉縞解析のためのデフォーカス処理を用いたハイブリッド画像処理法を提案し、実験を行なったので報告する。さらにデフォーカス処理は高周波雑音成分を含んだ干渉縞画像に対する前処理としても有効であることも述べる。

## 2. 干渉縞の尖鋭化処理

Mach-Zehnder 干渉計や Twyman-Green 干渉計などによる干渉縞の強度分布は、

$$I(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (1)$$

と表わされる。 $\alpha(x, y)$ ,  $\beta(x, y)$  はそれぞれバイアス成分と変調度成分であり、これらは写真処理の非線形性、および低周波の雑音である入射光量むらや光学素子の不均一性、などにより空間的に変化する分布をもつ。 $\phi(x, y)$  は位相の空間的分布であり、Mach-Zehnder 干渉計の場合、屈折率分布  $n(x, y)$  と厚み分布  $d(x, y)$  の物体を透過した物体光と参照光との間の光路差分布を  $l(x, y)$  とすると、これらの間には

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= (2\pi/\lambda)l(x, y) \\ &= (2\pi/\lambda)\{n(x, y) - 1\}d(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

の関係がある。ここで  $\lambda$  は使用する光源の波長で、空気の屈折率は 1 とした。

このような強度分布をもつ干渉縞画像からデジタル画像処理によりその縞の位置を決定する際に、(1)式のバイアス成分の空間的変化が位相成分の空間的変化に比較して無視できない場合、そのピークを検出することは非常に困難になる。したがって、バイアス成分をなんらかの方法で補正してやらなければならないが、従来行な

われてきた一つの処理法として、局所閾値法を用いる 2 値化処理がある。これは 2 次元の強度分布画像を多数の小領域に分割し、おのおの小領域内での計算によって求められた強度平均値、すなわち局所平均を閾値として閾値処理をするものである。しかし、この方法では小領域の大きさの設定、計算の複雑化、さらに閾値処理を行なった出力はピークをもたず、細線化処理を行わなければならないので縞の位置を正確には求められないといった欠点がある。

そこで細線化処理に伴う誤差・複雑さを取り除くために、光学的にデフォーカスさせることにより局所平均を求め、以下に示すようなデジタル処理による縞位置検出を行なう。いま、干渉縞の一断面に着目し、その強度分布は Fig. 1 に示した干渉縞の実線とし、そのデフォーカス像の強度分布を波線とする。ここで縞の位置をその縞のピークで代表させるとすると、縞の位置を求めるには一つの縞ごとに最大値を検出していけばよい。これを実行するためには、論理的に縞を一つごとに分割していかななければならないが、それは縞画像とデフォーカス像の強度分布の交点を用いることによって容易に解決できる (Fig. 1 参照)。すなわちその交点の間で最大値を検出して、その位置を求めていく。このようにして縞の位置は求められるが、その際 Fig. 1 の b 区間のようにその交点間に極大値を含まない場合、最大値を求める処理を行なうと、縞のピークではない最大値が出てくる。しかし、その最大値の位置はどちらかの交点の位置に等しく、またピークを含む区間と、含まない区間は交互にでてくるので、縞のピークではない最大値は処理の実行中に容易に取り除くことができる。

Fig. 2 に実験系を示す。処理される縞画像は写真画像、もしくはフィルム透明画として TV カメラの前面におかれる。デフォーカス像は TV カメラレンズ系を

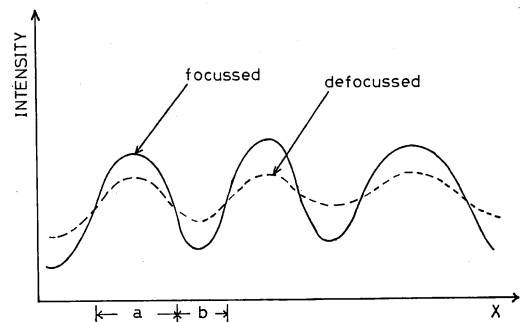


Fig. 1 Intensities of a cross section of interference fringes at focussed and defocussed image plane.

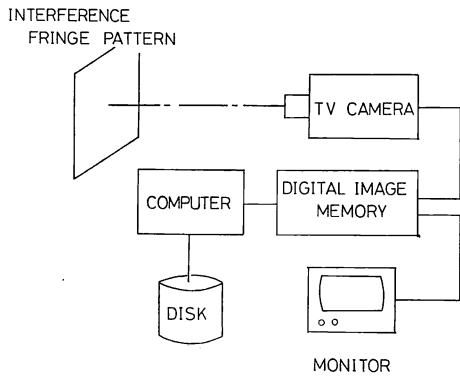


Fig. 2 Hybrid image processing system for interferogram analysis.

焦点結像位置から光軸方向に微動させることによって得る。TV カメラに入力された画像は最大  $256 \times 256$  に標本化、64 レベルに量子化されて計算機のディスクに入力される。前述の演算が計算機によって実行され、結果はモニター上に表示される。通常のレンズ系ではデフォーカスに応じて倍率がわずかに変化する。そのため原画像とそのデフォーカス像との交点が縞を一本ごとに分離しなくなり、以後の処理に誤差を与えてしまうことがある。本実験では、TV カメラレンズ系の前側焦点面に絞りを置いたテレセントリック光学系<sup>10)</sup>を用いて倍率の変化が生じないようにした。このテレセントリック光学系により主光線は像側で光軸に平行となり、光束は主光線を中心とする軸対象となる。したがって、像面を光軸方向に微動してデフォーカスさせても、像の中心をとった全体の大きさは変わらない。また、本実験のように物体距離が像距離に比較して非常に大きい場合、レンズ系を微動することは像面を微動することと等価である。

デフォーカス処理を用いる干渉縞の尖鋭化は以下の手順で行なわれる。最初に縞画像に焦点を合わせ、計算機のディスクに入力する。次に TV カメラレンズ系を微動してデフォーカスさせ、同じく計算機のディスクに入力する。その際、デフォーカス量はモニターを見ながら決定する。次に計算機により原画像とデフォーカス像との交点を求め、その交点間で干渉縞のピーク位置を検出し、結果をモニター上に表示する。この間のフローチャートを Fig. 3 に示す。

このデフォーカス像を用いる干渉縞の尖鋭化法は、その原理からわかるように、 $m \times n$  に標本化された画像データを 1 行ずつ走査して処理していくものである。したがって単純に上記の処理を行なっただけでは不都合な場合がある。たとえば、縞画像が Fig. 4 のような分布を

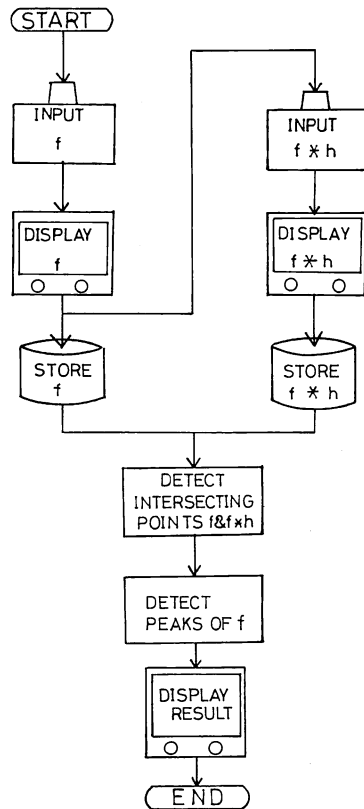


Fig. 3 General flow diagram of the peak detection of fringes: "f" is focussed image and "f \* h" is defocussed one.

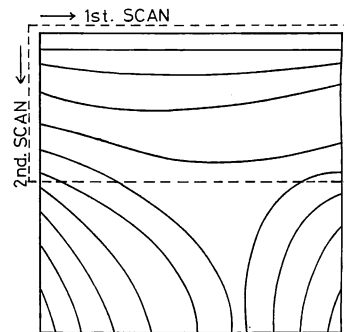
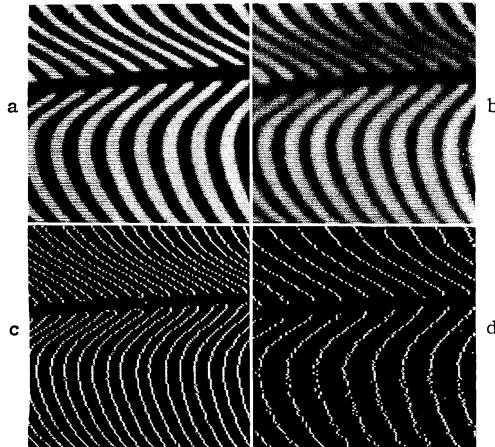


Fig. 4 Peak detection processed by scanning in two directions.

もつ場合、横方向だけの走査では破線に囲まれた領域で不都合が生じる。すなわち、計算機上のデジタル処理における走査方向と縞の方向が同じときは、上記の処理では望ましい結果を得ることはできない。しかし、Fig. 4 のような干渉縞も縦方向走査処理と、横方向走査処理を合成すれば望ましい結果を得ることができる。このよ



**Fig. 5** Experimental results of peak detection of interference fringes by Twyman-Green interferometer. (a) focussed image sampled into  $256 \times 256$  pixels, (b) defocussed image, (c) intersecting points of focussed and defocussed images, (d) peaks of interference fringes.

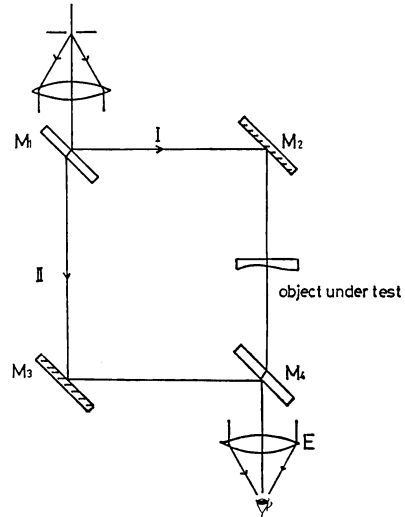
うに、 $90^\circ$  異なった走査方向を取ることによって、どのような縞の分布に対しても所望の処理が可能となる。この場合、 $90^\circ$  異なった方向の走査処理は画像データの行と列を入れ換えることによって簡単に実行することができる。

**Fig. 5** に Twyman-Green 干渉計による電熱線まわりの大気ゆらぎの干渉縞画像を処理した結果を示す。図中の細かな横縞はモニターの走査線で、各画像は  $128 \times 128$  に標本化してある。a 図は干渉縞画像をいったん写真に記録し、その写真を TV カメラより入力しモニター上に表示したもの、b 図は a 図のデフォーカス像である。c 図は a 図と b 図の強度分布の交点を示しており、d 図は c 図をもとに a 図のピーク分布を求めたものである。

以上述べたデフォーカス像を用いる干渉縞の尖鋭化処理は、オプティカル処理とデジタル処理の両方の長所を取り入れたハイブリッド処理である。デフォーカス像から得られるオプティカルな局所平均は、処理レンズ系の微動のみによって簡単に得られるばかりでなく、空間的な連続量として与えられその信頼性があるという長所を持っている。

### 3. ガラス板の厚み分布測定への応用

デフォーカス像を用いる干渉縞の尖鋭化処理を、透過物体の厚み分布測定に応用するため、Mach-Zehnder 干渉計により得られた干渉縞の解析を行なった。



**Fig. 6** Mach-Zehnder interferometer.

Mach-Zehnder 干渉計を **Fig. 6** に示す。反射鏡  $M_3$ ,  $M_4$  により反射された参照光と、 $M_2$  に反射され試料を透過した物体光との干渉縞強度分布は (1) 式となる。ここでは搬送波を導入するため  $M_3$  により、参照波を  $x$  軸に対して  $\theta$  だけ傾けている。このときの干渉縞の強度分布は

$$I(x, y) = \alpha(x, y) + \beta(x, y) \cos [2\pi f x + \phi(x, y)] \quad (3)$$

となる。ここで  $f$  は搬送周波数であり、傾角  $\theta$  とは

$$f = \sin \theta / \lambda \quad (4)$$

の関係がある。干渉縞の解析により位相分布  $\phi(x, y)$  が求めれば、これと試料の屈折率分布、および分布  $d(x, y)$  とは (2) 式の関係にあるので、屈折率分布が一様で  $n$  とすると厚み分布が求められる。すなわち、干渉縞のピーク位置を求め、その位置を  $x'$ ,  $y'$  とし、縞次数を  $m$  とすると (2)~(4) 式より、試料の厚み分布は

$$d(x', y') = (m\lambda - x' \sin \theta) / (n - 1) \quad (5)$$

となる。(5) 式から、参照波を傾けることにより波長単位以下の厚み分布も求められることがわかる。

ここでは、試料として研磨してある光学ガラス板を用いた。この試料の干渉縞画像を写真に記録したものを **Fig. 7** に示す。**Fig. 8** は、**Fig. 7** の実線で囲った部分を TV カメラより入力し、 $256 \times 256$  に標本化して、干渉縞の尖鋭化処理を行なった結果である。**Fig. 8** をもとに縞のピークの位置と縞次数を計算機により解析し、光学ガラス板の厚み分布を (5) 式より求め、得られた結果を 3次元表示したものを **Fig. 9** に示す。3次元表示する際、厚み分布の値が得られない位置では直線補

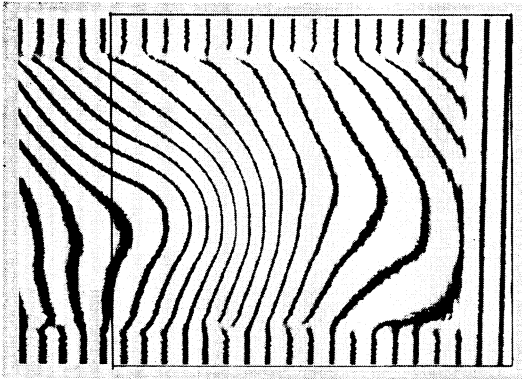


Fig. 7 Interferogram of an optical glass plate with tilt of reference wave.

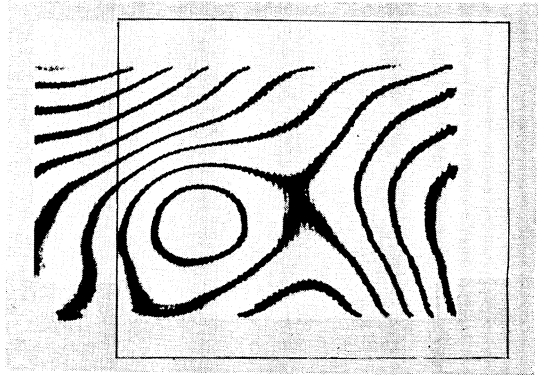


Fig. 10 Interferogram of optical glass plate without tilt of reference wave.

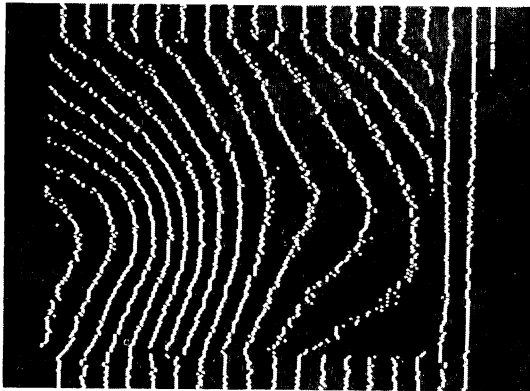


Fig. 8 Peaks of interference fringes shown in Fig. 7.

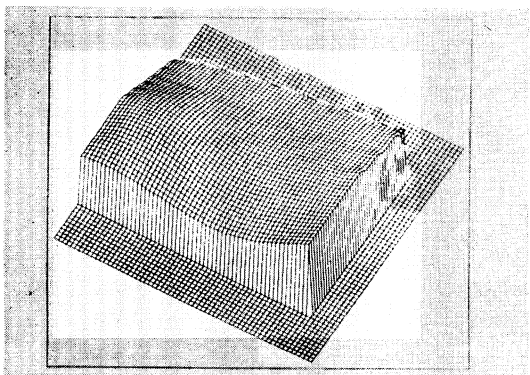


Fig. 9 3-D plot of analyzed fringe data shown in Fig. 7.

間により値を得た。ここで、縞次数は便宜上 Fig. 7 の右上端の縞を1としている。このため Fig. 9 は光学ガラス板の一点を基準とした相対的な厚み分布を示している。参照光を傾けているため、縞次数は  $x$  方向に単調に増加しており、以降の縞次数の決定は計算機により容

易に行なうことができる。Fig. 10 は Mach-Zehnder 干渉計において参照光を平行 ( $\theta=0^\circ$ ) にして得られた干渉縞で、厚み分布の等厚線を示すものであり、実線で囲った部分が Fig. 9 に相当する。

#### 4. デフォーカス処理による高周波雑音除去

前章までに、干渉縞解析のためのデフォーカス処理を用いたハイブリッド画像処理について述べたが、一方このデフォーカス処理は高周波数成分を含んだ干渉縞画像に対する前処理としても有効であることを述べる。

画像に含まれる雑音成分には、フィルム・印画紙等の粒子によるものや量子化誤差による電気的な雑音などがある。一般的に雑音成分は画像成分よりも空間的に高い周波数をもつため、雑音成分を除去するにはローパスフィルターが有効である。デフォーカス処理により高周波成分が抑圧されることが知られており、これは簡便な雑音除去法として用いられている。

Fig. 11a は二つの平面波の干渉縞を拡散ガラス板上に投影させたものを写真に記録し、TV カメラにより入力しモニターに表示したものである。画像は  $64 \times 64$  に

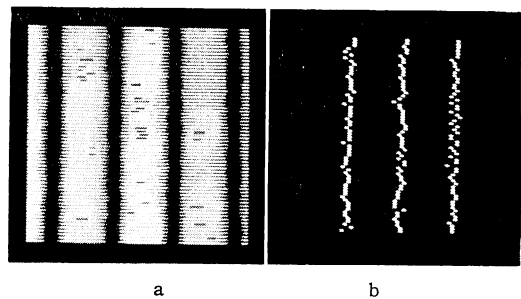
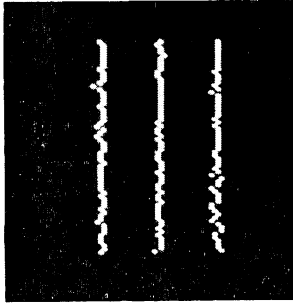


Fig. 11 Peak detection of interferogram with high frequency noise. (a) interferogram of two plane wave, (b) result of peak detection.



**Fig. 12** Result of peak detection using defocusing technique for noise reduction of interferogram.

標本化してあり、画面上横に走っている縞は走査線であり、干渉縞は縦に走っている。拡散ガラス板を用いたため空間的に高い周波数の雑音を含んだ画像であるが、モニター上に表示しているため視覚的にはよくわからない。この干渉縞画像を尖鋭化処理した結果が **Fig. 11b** である。この図では、3本の干渉縞に対してそれぞれピーク分布が求められているが、雑音による誤差がかなり出ていることがわかる。**Fig. 12** は **Fig. 11a** をわずかにデフォーカスさせたものを新たに原画像として尖鋭化処理した結果である。**Fig. 12** と **Fig. 11b** を比較すると、前処理としてのデフォーカス処理を加えることにより雑音除去が行なわれていることがわかる。

## 5. おわりに

干渉縞画像の局所平均を光学的なデフォーカス処理から求め、得られた局所平均を干渉縞のピーク分布を空間的に分離することに用い、分離された領域でそのピークを求める干渉縞の尖鋭化法を提案した。干渉縞のピーク的位置を求めるデジタル処理のアルゴリズムは簡単で、アナログ的なデフォーカス処理と合わせて、この干渉縞解析の処理全体を非常に高速に行なうことが可能である。さらに、参照光を傾けることにより精度の向上と縞次数決定の際の曖昧さを取り除くことができる。また、この処理法は写真上に記録された干渉縞画像を媒体とし

ているので非常に手軽であり、高速で移動する物体、あるいは物体の瞬間的な状態を解析する際にも有効である。

干渉縞の原画像とそのデフォーカス像との交点はその縞の最大勾配位置にあたりと解釈できる。したがって、この交点を縞情報として利用することもできるが、デフォーカス処理により倍率が変化するとき、交点は正しく最大勾配の位置を示さない。しかし、ここで提案した干渉縞の尖鋭化処理は、干渉縞のピークが空間的に分離されていけばよいから、倍率の変化による影響が少ない。このように、この処理は干渉縞画像の尖鋭化法としては精度が高い処理である。

また、デフォーカス処理は雑音を含んだ干渉縞画像に対する前処理としても有効であることが確かめられた。尖鋭化処理、および雑音除去の際の最適デフォーカス量の検討は今後の研究課題としたい。

## 文 献

- 1) 武田光夫：“サブフリンジ干渉計測基礎論”，光学，**13** (1984) 55-65.
- 2) 中島俊典：“ヘテロダイナ干渉法”，光学，**9**(1980) 266-274.
- 3) R. Crane：“Interference phase measurement,” *Appl. Opt.*, **8** (1969) 538-542.
- 4) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi：“Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1978) 156-160.
- 5) L. Mertz：“Real-time fringe-pattern analysis,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 1535-1539.
- 6) 豊岡 了，大橋勝樹，山田興治，小林久信：“高速縞解析用ハイブリッドシステム”，光学，**16** (1987) 407-413.
- 7) S. Toyooka and M. Tominaga：“Spatial fringe scanning for optical phase measurement,” *Opt. Commun.*, **51** (1984) 68-70.
- 8) T. Yatagai, S. Inaba, H. Nakano and M. Suzuki：“Automatic flatness tester for large scale integrated circuit wafers,” *Opt. Eng.*, **23** (1984) 401-405.
- 9) J. Tokumitsu, S. Kawata, Y. Ichioka and T. Suzuki：“Adaptive binarization using a hybrid image processing system,” *Appl. Opt.*, **17** (1978) 2655-2657.
- 10) M. Born and E. Wolf：*Principles of Optics*, 4th ed. (Pergamon Press, New York, 1959) p 187.