レーザー解説

光 波 干 渉 画 像 計 測

岩 田 耕 一*

(1985年9月12日 受理)

Pattern Measurements in Optical Interferometry

Koichi IWATA*

(Received September 12, 1985)

1. はじめに

最近、マイクロエレクトロニクスの急速な発達にともない画像のデジタル処理が幅広く研究されている。特に、パーソナルコンピュータによる画像処理装置が比較的安価になったため、これらの装置を利用して画像の計測を行おうという試みも数多くなされるようになった。顕微鏡による像をイメージセンサで受けて画像処理を行い、粒子の大きさの分布を求めたり、物体の特徴的な形を抽出してパターン認識する試みなどがそれである。これらの内の多くは、光の強度の分布を、どのようなアルゴリズムでいかに上手に処理するかに重点を置いている¹⁾。

測定対象をより良く知るためには、光により運ばれる情報をより多く取り出すことが重要である。そのためには、イメージセンサで検出するまでの光を測定に都合良い形に処理しておくことも必要である。この部分は光情報処理の役割である。

光の運ぶ情報には、強度以外に位相の情報がある。光波の位相の情報を取り出すには、普通、

干渉法を用いる。干渉法もこの意味で光情報処理の一つである。これをデジタル的な画像処理とうまく組み合わせることに依って、有効な情報をより便利に測定できる可能性がある。この解説では、この事を念頭において機械的な量の干渉画像計測の原理的、基礎的な部分を概観する。

レーザー計測技術の現状については、既に本誌に特集号がある²⁾。関連する部分も多いので、この解説の足りない部分はそれで補って頂きたい。

2. 干渉計測概説

2.1 干渉計測の特徴

光波の干渉によって測定されるのは、二つの光波の位相差 ψ もしくは光路差 ϕ である。両者には、光波の波長を λ として、 $\psi = 2\pi\phi/\lambda$ の関係がある。光路長は、光路の幾何学的長さと、その光路上の屈折率によって決定される。幾何学的長さは直接測定量として工業計測に必要なものであり、変位、速度、振動等に関係する。

* 大阪府立大学工学部機械工学教室 (〒591 堺市百舌鳥梅町4丁804)

* Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Osaka Prefecture (Mozu-Ume, Sakai, Osaka 591)

また、屈折率は媒質やその状態に依存するため、位相の測定から媒質の性質や圧力などの状態量を測定することができる。このように、干渉測定によって測定される量は広範囲に及ぶが、ここでは主として長さに関係した量に関するものを取り上げる。

干渉計測は最終的な測定量が何であるかに依らず、位相の測定と、その測定値からの測定量の計算との二つの部分に分かれる。前者は全ての測定量に共通の部分である。長さに話を限定しても、この部分はその他の測定にも同様の考えを応用できるものと思われる。

光を用いた計測の特徴の一つは、画像計測である。光の波長が $1\mu\text{m}$ 以下であるために空間分解能の高い測定が可能になる。もちろん、物体の1点に対応する変位や速度を測定することもできるし、そのような計測の例も多い。しかし、この解説では長さに関係した測定量がパターンである場合のみについて述べる。長さに関係したパターン量として、形状、変位分布、速度分布、振動パターン等が干渉計測で測定できる。

2.2 鏡面の測定

古典的な干渉法³⁾で形状の測定をする場合には、測定対象としての面は鏡面である。鏡面では表面の細かい凹凸の高さ（表面粗さ）が光の波長($0.4\sim 0.8\mu\text{m}$)に比べて小さい。このため光は正反射し、反射波の波面の形状は空間的にゆっくりと変化する。この物体光の波面が球面や平面に近い場合は、それとほぼ同じ形の球面や平面の基準波面（参照光）を用いると、アライメントによって干渉縞の間隔を広くすることができる。この場合には、普通の分解能を持つ感光材料やイメージセンサで空間的な強度変化をとらえることができる。

このようにして得られた干渉縞の明線は、両波面の光路差 ϕ が波長 λ の整数倍(m 倍)になる場所に対応する。すなわち、干渉縞の縞次数 m が分かれば、強度変化から光路差が

$$\phi = m\lambda \quad (1)$$

Fig.1 Arrangement of Twyman interferometer.

によって求められる。

この光路差と物体の形状との関係は、Fig.1のように光が被測定面にほぼ垂直に入射しているとき、

$$\phi = 2h \quad (2)$$

となる。 h は被測定面の基準鏡面の半透鏡による像からのずれの距離である。この関係は面に対する垂直入射が条件である。

当然の事ながら、物体の形が時間的に変化するれば、それに応じて波面も変わり干渉縞も変化するので、物体の変形の時間的経過を測定することができる。しかし、測定できるのは形状の変化であって、面上の点の位置変化を表す変位ベクトルが求められるのではない。

2.3 粗面の測定

表面粗さが光の波長程度より大きい粗面では光は乱反射もしくは散乱される。この様な面よりの反射光は、光波の進む方向が広い角度にランダムに分布しているため、その一部は観測のための光学系でけられる。その結果、粗面の像やその近くに細かい粒状性の明暗が見えることになる。これが、スペックルである⁴⁾。また、参照光との干渉縞を作っても、非常に細かく、かつ、ランダムであるため、高分解能の顕微鏡で見ない限りとうてい縞とは認識できない。

このような粗面に対して、その干渉縞から、表面の微細構造まで含めた形状測定をすることは、不可能でないまでも非常に難しい。また、そのような粗い面の形状を、光の波長のオーダーで測定すること自体あまり意味がない。工業的には、形状は表面粗さを平均した平均面に対して言うべきである。

粗面に対しては、その上の各点の変位を、たとえば、ホログラフィ干渉法で測定することができる⁵⁾。Fig. 2 にその模式図を示す。変形前の散乱波と参照波との干渉縞を写真乾板に記録し、変形後の散乱波を再び同じ光学系で二重に記録する。記録する乾板は細かい干渉縞を記録できるだけの分解能をもっていなければならない。

簡単のため図の様に散乱波の記録を物体の像の上で行ったと考えよう。変形後の像面上の干渉縞は、変形前の干渉縞とほとんど同じ形をしている。しかし、像の各点に対応する物体点の変位に応じて少し移動する。この結果、変形前後の二つの干渉縞のモワレ縞として、変位の分布に対応する縞が現れる。この縞のコントラストを上げるには、乾板に記録された干渉縞の特定の周波数の成分のみを取り出せばよい。ホログラフィでは、これを特定の方向に回折された光のみを検出するという方法で、光学的に行っている。これが再生段階である。コントラストの向上したモワレ縞が二重露光ホログラフィ干渉法による干渉縞に相当する。この干渉縞の次数を知って(1)より ϕ が求められる。コントラストの向上のために細かい干渉縞を利用しているため、この干渉縞を粗くすると特定の方向に回折された光のみをとり出せなくなり、処理の仕

Fig. 2 Recording process of holography.

方が複雑になる。

得られた光路差と変位ベクトル u との関係は、物体への入射光の方向の単位ベクトルを s_i 、観測方向の単位ベクトルを s_o とすると、

$$\phi = (s_i - s_o) \cdot u \quad (3)$$

となる。鏡面による反射では入射波の方向に対し反射波の方向は一意的に決定されるが、粗面では広い範囲に散乱されるので観測のための光学系で観測方向を規定する。

この解説の以後の図において、ホログラムはすべてホログラム上に物体の像を結像させるイメージホログラムとしている。これはスペックル干渉法など他の方法との対比を分かりやすくするためである。ホログラフィは波面再生技術であるので、多くの場合イメージホログラムである必要はない。

ホログラフィ干渉法では干渉する一方の光は物体とは関係のない参照波であった。これに対し干渉する二つの波に、同じ物体からの散乱光を用いる場合がある。Fig. 3 はこの例で、二開口スペックル干渉法^{4,5)}である。二つの開口からの光で像面には細かい干渉縞が記録される。この配置で二重露光をして得られた乾板に光を当て、特定の方向に回折される光のみを取り出せば、ホログラムの場合と同様に、変位に対応する干渉縞がみられる。この縞に表れる光路差と変位の関係は

$$\phi = (s_{o1} - s_{o2}) \cdot u \quad (4)$$

である。この場合も二つの開口を通った光による細かい干渉縞による特定方向の回折光だけを取り出して、変位に対応する干渉縞のコントラストを向上させている。

Fig. 3 Recording process of two-aperture speckle interferometry.

レーザードップラ法⁶⁾は流体中の一点における微粒子の速度を測る方法であるが、これも粗面からの散乱光に対する干渉法と同じであると考えられる。レーザードップラ法では、運動している物体により散乱された光と、他の光とを干渉させ、その干渉縞の移動によって生ずる一点での強度の時間的変化の周波数を測定して物体の速度を得る。流速の測定では流体中に含まれる微粒子が粗面の役割をする。変位の時間微分は速度であり、位相の時間微分は周波数であるから、位相により変位を測ることと、周波数により速度を測ることとは原理上は同等である。この意味でホログラフィ干渉法やスペックル干渉法で、短い時間間隔における変位の分布を測る方法⁷⁾は、原理的には、そのままレーザードップラ法の画像計測化であるとみなしうる。

3. 干渉計測とデジタル画像処理

3.1 目的の概略

干渉画像をデジタル計算機に取り込んで位相のデータから測定量の値を計算し、画像処理して測定量をディスプレイすることを考える。

鏡面の形状を測定する場合なら、干渉縞の強度分布から画像処理で明線および暗線の位置を求めてその次数を決定すれば、(1)および(2)より形状が決定できる。これにより、形状を実時間でディスプレイできる。縞の最大もしくは最小強度の場所を決定するには、画像処理のアルゴリズムが必要とされる。

粗面の変位を測定する場合を考える。この時には、変位前の細かい干渉縞を計算機内に記憶し、変形後の干渉縞との違いを求めればよい。もう少し正確に言うと、それぞれの干渉縞の特定の周波数の成分に対する位相の差を計算すればよい。

ホログラフィや本来のスペックル干渉法ではこの記憶を乾板上で行っており、特定の周波数の干渉縞を取り出す操作を光学的な情報処理で行っている。これを計算機内で行えば、乾板を現像する手間と時間を必要とせず測定が飛躍的に便利になるはずである。

3.2 分解能と画素数

上記のようなことを考えるとき、まず問題になるのは画像入力のためのイメージセンサの分解能と画素数である。固体イメージセンサで画素のピッチは $10\mu\text{m}$ 程度で、画素数は現在のところ最大で 1000×1000 程度である。これに対しホログラフィ用の感光材料では、分解能が 2000 本/ mm 以上のものもあり、画面の大きさが $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ とすると、画素数は 20000×20000 にもなる。

一方、干渉縞の間隔 W は干渉する二つの波面の角度 θ により

$$W=\lambda/2\sin(\theta/2) \quad (5)$$

と表される。 θ が 10° 程度でも W の値は $3\mu\text{m}$ になる。これを十分に分解するイメージセンサが必要になる。必要な画素数は場合によって異なるが、ホログラフィで良好な画面を得るためには、上記の感光材料程度の数が必要と思われる。

これから分かるように、鏡面の干渉の場合でも波面の間の角度が少し大きくなると普通のイメージセンサでは分解できない。まして、粗面から散乱された光によって生じた干渉縞をそのまま計算機に取り入れるのは困難である。

3.3 光学系の工夫

空間分解能および画素数の足りない現在のイメージセンサを用いて何とか上記の目的を達成しようとの試みが行われてきた。鏡面の形状測定については既にデジタル画像処理を用いた製品がある。

測定すべき形状が平面でない場合には、Fig. 1(b)のように測定面に近い形状の波面を作り、光学系を工夫して、観測面で測定光と基準光の波面が共にほぼ同じ形に近くなるようにして干渉縞の間隔を広げる。しかし、面の形状が単純でない場合には、測定面に垂直に入射する波面を作るための基準の光学素子が作れないので、干渉縞が細くなり測定が不可能になる。例えば、基準の球面からのずれが 1mm もある非球面の測定は難しい。

Fig.4 Electronic Speckle Pattern Interferometer.

基準面の代わりに基準面からの反射光と同じ波面を作り出すホログラムを計算により求め、プロッタなどで作画してそれを基準にする計算機ホログラムの試みもされている⁸⁾。

粗面に関する測定では、できるだけ散乱光の伝播方向を制限することによって、干渉縞を広げる。たとえば、Fig.4のように小さい開口の光学系を用いる。この光学系では参照光と物体光の伝播方向がほぼ同じなので、細かい干渉縞は生じない。しかし、そのため情報のデジタル処理が複雑になる。これは電子式スペックル干渉法ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) と呼ばれている⁹⁾。

計算機のみを用いることをあきらめて始めの干渉縞の記録を乾板で行うようにすれば後の処理が簡単になる。これが、実時間ホログラフィである。記録した乾板を現像後元の位置に置き、物体光と再生された光の間の干渉縞をそのホログラムを通してイメージセンサで検出する。このときは、物体光と参照光によって作られる細かい干渉縞を検出する必要はなく、場所的にゆっくり変化するモワレ縞相当の干渉縞を検出できれば、物体の変形の時間的経過が測定できる。ただし、写真処理は必要である。

4. 微小位相の測定

以上の説明では位相の測定は干渉縞の明線や暗線の位置を検出することによって行うものと考えていた。この場合位相はせいぜい $2\pi/10$ 程度までしか検出できない。更に感度良く測定する方法がいくつか考えられている¹⁰⁾。

4.1 ヘテロダイン干渉計

Fig.5 Heterodyne interferometer.

光のビートを利用する方法である。基準光と物体光の周波数を $\Delta\omega$ だけ異ならせる。干渉の結果周波数 $\Delta\omega$ の電気信号がえられる。この信号の位相は基準光と物体光の位相差にあたるので、電気的に位相を検出して物体光の位相を求められる。この場合には $2\pi/1000$ 程度まで位相を検出できるので、測定の感度が向上する。

Fig.5は光ヘテロダイン法を物体の表面形状の面計測に用いた例である¹¹⁾。ここでは周波数の異なる2つの光を、超音波光変調器 (AOM) によって得ている。高出力のKrレーザー光を2つに分け、AOMを通してそれぞれ42MHzおよび43MHzだけ周波数を変化させる。物体照明光と参照光に異なる周波数シフトを受けた光波を用い、干渉光をイメージ・ディセクタ・カメラで電子走査して位相差のパターンを得ている。

通常のイメージセンサでは1/30 secの間光の強度を積分するので1 MHzの速い信号を検出できないのでイメージ・ディセクタ・カメラが用いられている。このカメラでは画面上の1点で

1MHzのビート信号を検出してその位相を測定したのち次の点に移る。鏡の面の形状とその熱膨張による変化を10nm程度の精度で測定している。

ヘテロダイン法では、ある点の位相をもとめるのにその点の強度の時間的変化のみが関係する。干渉縞の最大強度の位置をもとめる場合のように周りの点のデータを必要としないのでデータ処理が行いやすい。

粗面の変位を測定するヘテロダイン・ホログラフィでは再生時にヘテロダイン法を用いる^{12,13)}。Fig. 6のように二重露光の1回目と2回目に同じ周波数で方向の異なる参照光を用いて記録し、再生時に一方の参照光の周波数を他方に比べて $\Delta\omega$ ずらせて同時に再生する。再生された二つの光の間のビート信号の位相から変位が感度良く求められる。普通、光電子増倍管でビート信号を検出し、機械的に走査をして画像情報をえている。

4.2 縞走査干渉計 (位相シフト干渉計)

光電変換をTV用のイメージセンサを用いて行うとヘテロダイン法の速い周波数の変化に追従することはできない。そこで基準光の光路長を既知量だけ変化させる方法によって感度を高める縞走査法を用いる¹⁴⁾。この方法ではFig. 7の干渉計で基準光路の鏡を $\lambda/8$ ずつ4回平行移動させてそのたびに干渉光の強度分布を測定し、その4つの強度データ (I_1, I_2, I_3, I_4)をもとに

$$\phi = (2\pi/\lambda)^{-1} \arctan \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} \quad (6)$$

の式によって計算して位相分布を求める。感度は $\lambda/100$ 程度が可能と思われる。この方法は変

Fig.6 Heterodyne holographic interferometer.

Fig.7 Fringe scanning interferometer.

化の早い物体には適用できないが、比較的手軽に鏡面の形状が高感度で求められる。微小な光路長の変化には圧電素子を用いることが多い。

ヘテロダイン・ホログラフィと同様の光学系を用い、再生時に周波数の偏移を起こさせる代わりに、一方の参照光の位相を既知量変化させて、縞走査法で微小位相を検出することもできる。

4.3 空間的縞走査法

基準光と物体光の波面を故意に傾けると干渉縞は細かくほぼ平行な線となるが、物体の凹凸に応じて平行な干渉縞の位置がずれる。この位置ずれから微小な位相が求められる。これを行うのに全画面の強度データを記憶してデジタルにフーリエ変換し、特定の空間周波数のみを取り出して位相分布を求めることもできる¹⁵⁾。

この方法では必然的に干渉縞が細くなるためイメージセンサの分解能を要求されるが、縞走査法のように複数画面のデータを必要としないので、時間的に変化する物体に対しては本質的に有利であると考えられる。また、干渉縞の次数を読み取ることも容易である。

5. 測定範囲の拡大

5.1 二波長法の説明

干渉画像計測では、形状などが空間的に連続して変化していると、干渉縞の次数も1次ずつ増減するので、縞次数を同定することは可能であるが、形状が不連続に1縞以上変化している場合、縞の次数が分からなくなる。白色光を光

源に用いると、零次光は白色になるのでこの場合にも次数を知ることができるが、干渉性の良い光の場合には、干渉縞の区別がつかないので、次数を別の知識から求めなければならない。また、連続な場合でも+1 か-1 かの判断は難しい。

縞の数を減らしてより長い長さ変化を同一の縞次数内に納めればこの困難は取り除ける。そのためには、波長の長い光を用いればよい。たとえば、炭酸ガスレーザーの $10.6\mu\text{m}$ 発振波長を用いれば、 $5\mu\text{m}$ 程度の形状の不連続変化は問題でなくなる。しかし、この波長の光に対する適当なイメージセンサがないので、画像計測としては、まだ、殆んど用いられていない。

可視光を使って同様なことを行うには近接した二波長 λ_1, λ_2 の光を用いる。 λ_1 に対する干渉縞と λ_2 に関する干渉縞は、位相差が0の時には一致するが、位相差が大きくなるにつれて、位置のずれが大きくなり、光路差が

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

になると1次ずれた縞が重なる。この値以下の光路差は二つの縞のずれから一義的に次数を求めることができる。縞走査法などの微小位相測定法を用いれば、小さいずれまで読み取れるので、二つの波長の差を小さくでき、大きな光路差まで求められる。

5.2 鏡面の形状測定

二波長縞走査法を鏡面の測定に応用している

Fig.8 Two-wavelength interferometer.

のがFig.8である¹⁶⁾。ここでは、He-Neレーザー($\lambda=632.8\text{nm}$)とArレーザー($\lambda=514.5\text{nm}$)の波長の組合せを用い、 $2.75\mu\text{m}$ の Λ を得ている。

λ_1 と λ_2 に対する干渉縞のずれから、 λ_1 に対する縞次数を求め、次に、 λ_1 に対する位相ずれから微小な形状変化を求める。 $200\mu\text{m}$ のくぼみのある鏡に平面波を入射して測定し、 2.5nm の繰り返し精度を得ている。この方法が有効に働くためには、イメージセンサがそれぞれの波長に対する干渉縞を検出できなければならない。ここでは、1024素子のリニアアレイを用いている。分解能の良くないセンサを用いると、あまり変化の大きい形状は測定できない。

5.3 ホログラフィ形状測定

同様の方法をホログラフィ干渉法に応用した例もある (Fig.9)¹⁷⁾。ここでは、ホログラムにサーモプラスチック乾板を用いている。これにより、乾板を取り外すことなく、その場で写真処理が行える。

手順は、まず第一の波長で露光し写真処理し、その後波長を変える。ホログラムで回折された光と直接物体から来た光とが干渉し、 Λ の波長を用いたのと同様な干渉縞が表れる。この意味で Λ を等価波長と呼んでいる。再生時に参照光の光路長を微小に変化させ、縞走査法で位相を求める。 Λ の波長に対する位相の端数を求めることができる。

このホログラムはイメージホログラムであることが必要である。これは波長の違う光で再生した場合、再生像のひずみがホログラムから遠

Fig.9 Two-wavelength holographic Interferometer.

いほど大きくなるためである。

波長を変化させたとき参照光の角度を調節する必要がある。これを参照光路中の鏡で行っている。488nmと514nmで $9.47\mu\text{m}$ の等価波長を得、その1/100程度の繰り返し精度が得られている。

この方法は二つの波長それぞれに対する干渉縞は検出しなくてもよく、等価波長に対する干渉縞が検出できればよい、ホログラフィにより光学的に情報の抽出が行われているからである。このため、センサとして 100×100 個のフォトダイオード・アレーが利用されている。

5.4 基準ホログラムとの差の測定

基準のホログラムを作って、物体との差を求める場合でも、基準波面と物体波面の差が大きいと、縞が細くなるとか次数の決定ができないなどの問題が起こる。Fig. 10はこの様な場合に波長変化法を応用した例である¹⁸⁾。ここでは、計算機ホログラムの代わりにゾーンプレートを用いている。これは、波長が582.14nmの軸方向にずれた二つの点光源からの光を干渉させて作った一種のホログラムである。球面波を生じさせるホログラムと思えばよい。

図のゾーンプレートにより回折された光は、測定対象である非球面鏡にほぼ垂直に入射しもとの方向に戻る。この光と、鏡の中心に当たり、帰りにゾーンプレートで回折される光とが干渉する。光源に波長可変の色素レーザーを用いて、

Fig.10 Dynamic zone-plate interferometer.

波長を582.07nmから578.24nmまで変化させている。波長を変化させるとゾーンプレートの回折角が変化するので干渉縞が粗く現われる位置が変化する。回折角の変化は理論的に計算できるので、縞の位置を読んで非球面の形状を求められる。解析の方法に等価波長の考え方を採用していないが、本質的には同じような測定法であると考えられる。干渉縞は写真に記録し解析しているが、デジタル画像処理をすることは可能であろう。

6. シアリング干渉計

以上の干渉計は物体光と基準光との干渉によって生じた干渉縞から両者の差を求めるものであった。ここでは、物体からの反射光を少しずらして重ね合わせるシアリング干渉法について述べる。この方法の利点は、干渉する二つの波がほぼ共通光路を通るため、外乱の影響を受けにくいこと、ずれ量を調節して、干渉縞の間隔や測定の感度を調節できることである。

6.1 鏡面の形状測定

Fig. 11は縞走査法をシアリング干渉法に用いた例である¹⁹⁾。図のシアリング干渉法では物体からの反射光を二つに分け一方を光の進行方向に対して垂直にずらし干渉させる。圧電素子で一方の光路長を微小に変化できるようになっている。位相差の測定は縞走査法で行う。得られた位相差は、物体から反射された波面をずらし方向に微分したものに当たるので、積分によって波面の形が得られる。これから、非球面形状が求められる。

Fig.11 Fringe scanning shearing interferometer.

6.2 粗面の変形測定

シアリング干渉法を粗面の変位の測定に応用した例がFig. 12である¹⁹⁾。細かい回折格子を、像面に平行に微小なすき間をあけて置く。この回折格子は一次回折光と零次回折光のみが生じるように作ってある。二つの光は回折方向が異なるので像面では波面の横ずれが生じ、それらが干渉する。干渉縞は回折格子と同じ細かさである。物体の変形前と変形後の二重の露光を行う。記録には高解像度の乾板を用いている。写真処理後この乾板に光をあて、その一次回折光を観測すれば、変位のずらし方向 (x 方向とする) の微分を表す干渉縞が得られる。光路差と変位の関係は、物体面上に換算した横ずれ量を Δx とすると

$$\phi = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot (s_1 - s_0) \Delta x$$

となる。この方法では二重露光で記録する干渉縞が細かいので記録にイメージセンサは用いられない。

7. おわりに

イメージセンサで光信号を電気信号に変換し、データの処理をデジタルに行うことの可能性を念頭に置きながら、現在の干渉計測について概観した。現在でも、かなりの部分が従来の写真記録にとって変わっている。しかし、まだ写真記録に頼らねばならない部分も多い。特に、粗面の干渉測定では満足な結果が得られていないように思われる。

これをより有用な計測法にするための方法としては、二つの方向がある。一つは、現在のイメージセンサの性能で向上である。満足な計測ができるためには、分解能と画素数の大幅な向上が望まれる。高品位テレビなどに関連して発

展するセンサや画像プロセッサの技術の動向が注目される。他の方向は、新しい感光材料の開発である。かなり状来のことであろうが、非線形光学を利用した位相共役波²⁰⁾の利用も考えられる。

干渉計測により測定されたパターンが、画像処理されて実時間で表示され我々の目を楽しませたり、ロボットが干渉計測の結果を認識して働く日はいつであろうか。

参考文献

- 1) 尾崎, 谷口, 小川: 画像処理 (共立出版, 1984).
- 2) 久間, 中島: レーザー研究, **13** (1985) 6.
諸隈: レーザー研究, **13** (1985) 69.
- 3) 久保田: 波動光学 (岩波書店, 1971).
- 4) J. C. Dainty: *Laser speckle and related phenomena* (Springer Verlag, 1975).
- 5) 山口: 光学, **12** (1983) 306.
- 6) T. S. Durrani et al.: *Laser systems in flow measurements* (Plenum Press, 1977).
- 7) 岩田: 光学技術コンタクト, **17**(6) (1979) 6.
- 8) 谷田貝: 精密機械, **47** (1981) 1541.
- 9) R. K. Erf: *Laser Applications*, Vol. 4 (Academic Press, 1980) p. 45.
- 10) 谷田貝: 精密機械, **51**(2) (1985) 13.
- 11) N. A. Massre: *Appl. Opt.* **19** (1980) 154.
- 12) 格内: オプトロニクス (1983) No.3, 31.
- 13) R. Dändliker: *Progress in Optics*, Vol. 17, edited by E. Wolf (North Holland, 1980).
- 14) J. H. Brunning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: *Appl. Opt.* **13** (1974) 2693.
- 15) 武田: 光学, **13** (1984) 55.
- 16) Y. Y. Cheng and J. C. Wyant: *Appl. Opt.* **23** (1984) 4539.
- 17) J. C. Wyant, B. F. Oreb and P. Hariharan: *Appl. Opt.* **23** (1984) 4020.
- 18) N. Ohyama, I. Yamaguchi, I. Ichimura, T. Honda and J. Tsujiuchi: *Opt. Commun.* **54** (1985) 257.
- 19) Y. Iwahashi, K. Iwata and R. Nagata: *Appl. Opt.* **23** (1984) 247.
- 20) 丹野: 応用物理: **49** (1980) 831.

Fig.12 Speckle shearing interferometer.