

## 研究

## 3次元変位測定のためのヘテロダイン・ ホログラフィー干渉法

格内 敏\*・岩田 耕一\*\*・永田 良\*\*・関口 久美\*

\* 姫路工業大学機械工学教室 〒671-22 姫路市書写 2167

\*\* 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

(1984年12月10日受理)

### Heterodyne Holographic Interferometry for the Measurement of Three Components of Displacement Vector

Satoshi KAKUNAI,\* Koichi IWATA,\*\* Ryo NAGATA\*\* and Hisayoshi SEKIGUCHI\*

\* Department of Mechanical Engineering, Himeji Institute of Technology,  
2167, Shosha, Himeji 671-22

\*\* Department of Mechanical Engineering, College of Engineering,  
University of Osaka Prefecture, 4-804, Mozu-Umemachi, Sakai 591

A new method for measuring three-dimensional displacements which uses a single hologram and a compact optical system is proposed and verified by experiments. The method realizes the measurement by observing the object through four points on the hologram and by using heterodyne method to detect accurate phase difference. The high accurate phase measurement allows us to use small separational angles of the observing directions in measuring displacement vector. The small separational angle allows us to use a single lens to reconstruct the object recorded at different points in the hologram. Thus, the reconstructed images are distortionless.

#### 1. ま え が き

ホログラフィー干渉法を利用すると、粗面物体の微小な変形や振動状態を干渉縞パターンとして非接触に記録できる。この干渉縞は、照明方向と観察方向との二等分線方向の等変位曲線群に相当する。一般に、測定対象の形状が単純で変位方向がおもに1方向である場合には、照明方向と観察方向の二等分線方向を、その変位成分と一致させた光学系を用いることにより、その変位成分を取り出すことができる。しかし、機械部品などのように形状が複雑になると、各測定場所により変位方向は異なり、1方向からの測定だけでは変位の立体的な把握が困難となる。このために、従来からホログラフィー干渉法を用いた3次元変位の測定に関する試みがいくつかなされて<sup>1-7)</sup>。

変位の3成分を求めるには、少なくとも三つ以上の感度ベクトルをもつホログラムにより干渉縞を作成し、各

点の縞次数を、それぞれのホログラムの再生像上で計数する必要がある。異なる感度ベクトルを実現するには、3方向照明1方向観察および1方向照明3方向観察の光学系が考えられる。前者は、各観察方向からの再生像の形状が変わらないために、各像における測定位置が明確となりデータ処理が容易である。しかし、ホログラム記録においては、各物体照明方向ごとに別々の時間間隔においてホログラムを記録する必要があるために、動的な現象の測定はできない。後者は、ある瞬間における物体変形を一度に3方向から得ることができるが、各観察方向における像の形状が異なって再生される。

変位の3成分を精度よく測定するには、大きく離れた感度ベクトル方向をもつ光学系を作製して記録することと、干渉縞の読取り精度を十分に高めることが必要である。干渉縞の読取りを従来の縞補間法で行なうと、干渉縞の強度を電気信号に変換して測定しても、波長の1/10程度の精度しか得られない。したがって、いままでは大

きな感度ベクトル方向をもつ光学系を採用する必要があった。

本論文では、近年盛んに利用されているヘテロダイン法<sup>8,9)</sup>を、干渉縞の読取りに使用するヘテロダイン・ホログラフィー干渉法<sup>10)</sup>を用いた3次元変位測定法について報告する。光学系は1方向照明3方向観察の光学系を利用しているが、ヘテロダイン検波による高感度な1/360 縞程度の縞補間技術により、小さな分離角をもつ感度ベクトル方向からの観察によって、比較的よい精度での3次元変位の測定を可能としている。したがって、比較的小さな1枚のホログラム上で、3次元測定に必要な三つの感度ベクトルが得られる。その結果、それぞれの位置からのホログラム再生像は、ホログラムに接近して置かれた1枚の結像レンズによって、同一結像面上で一一致した像を形成する。また、ホログラム参照光のための光定系がコンパクトになるので、複雑な形状をもつ測定物における影の問題もなくなる。ここでは、この3次元変位測定のための干渉法の提案と干渉計の概要、およびこの装置を用いて行なったモデル実験の結果について報告する。

## 2. 縞次数測定精度と変位精度

ヘテロダイン・ホログラフィー干渉法では、変形前後の物体の記録にそれぞれ別の参照光を用いてホログラムを作製する。再生時に二つの参照光間に小さな周波数偏移を加えて、二つの光波間の干渉縞の強度を光電変換することにより、縞次数に相当する変位量が差の周波数の電気信号の位相として求まる。この電氣的位相測定法では、変位方向の判別はもとより、測定場所における強度変化の影響は受けないうために、すべての位置で同精度に比較的容易に1°すなわち1/360の縞読取り精度が得られる。この高感度な縞補間能力が感度ベクトルに必要な分離角を小さくすることを可能にする。

物体上の1点に関して、 $m$ 個の観察方向( $m \geq 3$ )において求めた縞次数を $m$ 元の列ベクトルで表わし、 $\mathbf{N}$ とおく。また物体照明方向の入射方向を表わす単位ベクトル $\mathbf{S}_i$ と観察方向 $\mathbf{S}_{0j}(j=1, 2, \dots, m)$ とによって作られる係数マトリックスを $\mathbf{K}$ とおく。このとき、観察点の変位列ベクトル $\mathbf{u}$ は、光源の波長を $\lambda$ とすると次式で表わせる<sup>11)</sup>。

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{N} \lambda \quad (1)$$

ここにおいて

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_i + \mathbf{S}_{01} \\ \mathbf{S}_i + \mathbf{S}_{02} \\ \vdots \\ \mathbf{S}_i + \mathbf{S}_{0m} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_m \end{bmatrix}$$

ただし、 $\mathbf{S}_i + \mathbf{S}_{0j}$ は行ベクトルである。したがって、変位ベクトル $\mathbf{u}$ の最小二乗推定値は、次式で表わされる正規方程式を解くことにより求まる。

$$\mathbf{u} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{N} \lambda \quad (2)$$

$\mathbf{N}$ に誤差 $\Delta \mathbf{N}$ があるとき、 $\mathbf{u}$ に誤差 $\Delta \mathbf{u}$ が生じる。すなわち

$$\Delta \mathbf{u} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \Delta \mathbf{N} \lambda \quad (3)$$

$\Delta \mathbf{u}$ の大きさを見積もるのに、 $\Delta \mathbf{u}$ の分散共分散行列を作ると次式となる。

$$\Delta \mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{u}^T = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \Delta \mathbf{N} \Delta \mathbf{N}^T \lambda^2 \quad (4)$$

ここで、 $\Delta \mathbf{N}$ はランダムで各ホログラムにおいては相関をもたなく独立である。そのばらつきの大きさはすべて同じく $\sigma_N^2$ とすると、 $\Delta \mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{u}^T$ の期待値 $\langle \Delta \mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{u}^T \rangle$ は次式となる。

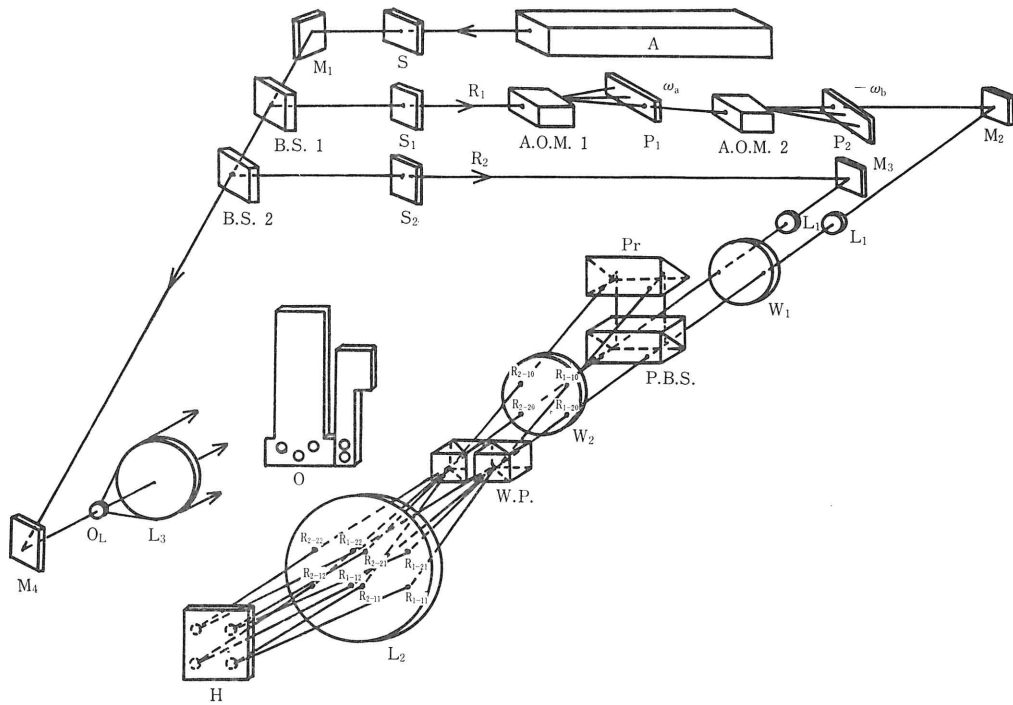
$$\langle \Delta \mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{u}^T \rangle = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \sigma_N^2 \lambda^2 \quad (5)$$

この式より変位精度 $\langle \Delta \mathbf{u} \cdot \Delta \mathbf{u}^T \rangle$ は、光学系によって定まる $(\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1}$ の条件が悪くても、縞次数測定精度 $\sigma_N^2$ が向上するとよくなるのがわかる。本論文の方法では、ヘテロダイン・ホログラフィーを用いて縞次数の測定精度を向上させることにより、係数 $(\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1}$ が比較的大きい場合にも、よい変位精度を得ようと試みた。

## 3. 実験装置および方法

実験に用いた光学系の配置をFig. 1に示す。二つの参照光 $R_1, R_2$ の間に与える周波数の偏移は、二つの音響光学変調器AOM(中心周波数40MHz)を通過させることによって得られる。AOM<sub>1</sub>通過後には+1次の回折光を取り、AOM<sub>2</sub>通過後には-1次の回折光が取れるようにピンホール $P_{1,2}$ を配置する。その結果、AOM<sub>1,2</sub>の周波数をそれぞれ $\omega_a, \omega_b$ とすると、AOM<sub>2</sub>通過後の参照光には、 $\omega_a - \omega_b$ だけ周波数偏移が加わる。光学系は1方向照明4方向観察の配置であり、四つのホログラムは4組の参照光 $R_1, R_2$ によって、1枚の小さな乾板上で記録する。

この四つのホログラムへの参照光は、比較的コンパクトな光学系で作製される。光源から出た光は、ビームスプリッターにより二つの参照光 $R_1, R_2$ と物体照明光に分けられる。参照光 $R_1, R_2$ は、1/2波長板 $W_1$ により偏光方向を45°回転して偏光ビームスプリッターPBSに入れる。これにより、参照光は直進するP偏光( $R_{1-20}$ ,



**Fig. 1** Optical arrangement for measuring three components of displacement vector by heterodyne holographic interferometry.

A: Ar<sup>+</sup> laser, S: Shutter, M: Mirror, BS: Beam splitter, AOM: Acousto-optic modulator, P: Pinhole, L: Lens, W: Half wave plate, PBS: Polarizing beam splitter, Pr: Prism, WP: Wollaston prism, H: Hologram, O<sub>L</sub>: Object lens, O: Object.

R<sub>2-20</sub>) と上方に反射される S 偏光 (R<sub>1-10</sub>, R<sub>2-10</sub>) に分かれる。S 偏光は PBS の上に置いたプリズムにより反射され、ウオラストンプリズム WP の中央で P 偏光と交わる。これら 4 本の光線は、WP への入射前に 1/2 波長板 W<sub>2</sub> を通ることにより、偏光方向を 45° 回転してすべて同一方向の偏光となる。ウオラストンプリズムに入ったこれら 4 本の光線は、19° の分離角で P 偏光 (R<sub>1-21</sub>, R<sub>2-21</sub>, R<sub>1-11</sub>, R<sub>2-11</sub>) と S 偏光 (R<sub>1-22</sub>, R<sub>2-22</sub>, R<sub>1-12</sub>, R<sub>2-12</sub>) に分けられる。したがって WP から出てくる参照光 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> は、八つの光線となる。この光線群が WP の中心近傍に焦点をもつレンズ L<sub>2</sub> を通ると、そのうちの 2 本の組 (R<sub>1-21</sub> と R<sub>2-21</sub>, R<sub>1-22</sub> と R<sub>2-22</sub>, R<sub>1-11</sub> と R<sub>2-11</sub>, R<sub>1-12</sub> と R<sub>2-12</sub>) が、その焦点面上に置かれたホログラフィー乾板上の 4 点に収束する。この 2 本の光線の一方が R<sub>1</sub>, 他方が R<sub>2</sub> となる。なおレンズ L<sub>2</sub> の焦点距離 f<sub>2</sub> の位置と一致するように、焦点距離 f<sub>1</sub> をもつレンズ L<sub>1</sub> を参照光 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> の光路に挿入することにより、レンズ L<sub>1</sub> に入射前のレーザービーム径 d は、レンズ L<sub>2</sub> を射出した後 df<sub>2</sub>/f<sub>1</sub> の径をもつ参照光となる。

変形前にはシャッター S<sub>2</sub> を閉じておき、参照光 R<sub>1</sub> によって記録する。このとき、二つの AOM は同一の発振器を用いて動作させることにより ω<sub>a</sub>=ω<sub>b</sub> とし、R<sub>1</sub> に周波数偏移を与えない。同様に変形後は、シャッター S<sub>1</sub> を閉じておき参照光 R<sub>2</sub> によって記録する。記録されたホログラフィー乾板は、実時間法の現像処理装置を用いて、その場で現像処理を行なう。

自然乾燥したホログラムにできるだけ接近して結像レンズを配置し、元の参照光 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> を入射すると、スクリーン上に従来の二重露光干渉縞が生じる。ヘテロダイン検波を行なうために、二つの AOM の動作を別々の発振器を使って行なうことにより、R<sub>1</sub> に 1 kHz の周波数偏移を与える。ホログラムからの二つの再生光波は検出器で光電変換され、差周波数をもつ電気信号波形となる。変位の測定は、物体の各点についてホログラムを一つずつ開閉して行なう。基準側と測定側に置かれた光電子増倍管で得られる二つの信号の位相差は、シンクロスコープに写し出されたリサージュ図形が直線となるように、移相器 (最小設定値 0.1°) を調整してその位相差を読み取る。

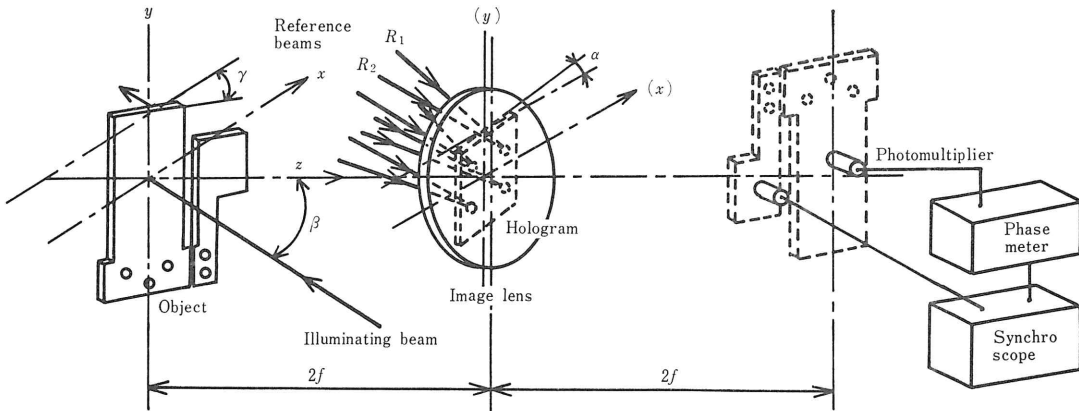


Fig. 2 Holographic system geometry for measuring deformation by electronic phase detection.

実験対象として、片持りの曲げによる変位測定を選んだ。片持りは、その曲げ方向をホログラム法線方向に対して傾けて配置した。測定物体としては、長さ 70 mm、幅 20 mm、板厚 3.14 mm の純アルミニウム板材を用いた。なお物体面には、反射をよくするために白の無光沢塗料を吹き付けてある。曲げ量は固定端から 65 mm の所に集中荷重をバネ力により加えて、その場所のたわみ量を電気マイクロメータで測定しながら約 2 μm を与えた。

ホログラムと片持りの配置は Fig. 2 に示してある。ホログラム中心とはりの中心を結ぶ方向を z 軸とし、それに垂直に x, y 軸を取る。ホログラムおよび片持りは x, z 面に垂直に置かれており、それぞれ x 軸に対して  $\alpha = -1.1^\circ$ ,  $\gamma = 26^\circ$  だけ傾いている。物体照明光は平行光で、xz 面内で z 軸に対して  $\beta = 39.6^\circ$  の角度から入射している。参照光 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> は直径約 2 mm の平行光であり、そのなす角は再生時に直接像が、記録時の参照光と異なる再生光によって再生されるクロス像と重ならない程度に広げられている。光源には Ar<sup>+</sup> レーザー (波長 0.514 μm, 出力約 700 mW) を使い、ホログラムは 1/4 秒の露光時間で、1 枚の乾板上に横 28 mm、縦 23 mm のホログラム中心間隔をもつような配置で四つ作製した。

4. 実験結果と考察

はりの変位分布の測定は、結像レンズ (焦点距離 120 mm, レンズ口径 80 mm) によって再生された虚像面上において、光検出器として直径 1.32 mm のピンホールの窓をもつ二つの光電子増倍管により行なう。検出器の一方は無変位の状態を表わす基準板にセットし、他方

を上下微動移動装置に取り付けてある。変位の測定は、はりの y 軸に沿って荷重点から固定端に向かい、電気マイクロメータで ±1 μm の精度で位置の読取りを行ないながら、5 mm 間隔ごとに中心付近まで実施した。一つのホログラムの大きさは、参照光のビーム径に等しく直径約 2 mm であった。像面上のスペックル径は約 76 μm となるので、検出面積内には 300 個程度のスペックルが入っていることが予想される。再生像は、参照光 R<sub>1</sub> の AOM による光量損失を考慮して、前もってビームスプリッター BS<sub>1</sub> の透過光と反射光の比率を調整しておくことによりできるだけ明るくした。

y 軸上の各測定位置における測定結果を使って、(2) 式より計算した各変位方向の変位成分の結果を Fig. 3 に示す。図中の○印は実験値であり、実線は固定端から

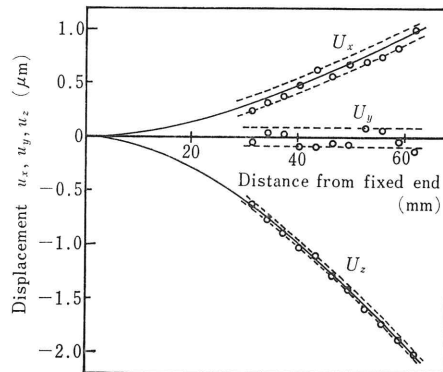


Fig. 3 Three displacement components  $U_x$ ,  $U_y$  and  $U_z$  of the cantilever beam along the y axis in Fig. 2.

○: Experimental value, —: Theoretical value, ---: Ranges of the allowable absolute error in the case  $\sigma_N = 8^\circ$ .

65 mm の所に  $2.4 \mu\text{m}$  の変位を与えたとした場合の、材料力学におけるたわみの式から求めた理論値を示している。  $u_x, u_y$  成分は  $u_x$  成分に比べ実験値にはばらつきが見られるが、理論値と定性的にはよく一致している。測定値のばらつきは、検出器などの電気系における位相読取りの安定性、結像レンズの収差による影響、変位勾配に対する検出面積の大きさの問題、ホログラムの記録状態などの原因が考えられる。

縞次数測定精度が変位精度に及ばず影響については、(5)式を使って計算できる。式より  $\langle \Delta u \cdot \Delta u^T \rangle$  の対角線要素で表わされる変位誤差の分散  $\sigma_{u_x}^2, \sigma_{u_y}^2, \sigma_{u_z}^2$  は、  $(K^T K)^{-1}$  の対角線要素を  $K_{11}^2, K_{22}^2, K_{33}^2$  とすると、縞次数読取り誤差  $\sigma_N$  と使用光源の波長  $\lambda$  とによって次式のように表わせる。

$$\begin{cases} \sigma_{u_x}^2 = K_{11}^2 \sigma_N^2 \lambda^2 \\ \sigma_{u_y}^2 = K_{22}^2 \sigma_N^2 \lambda^2 \\ \sigma_{u_z}^2 = K_{33}^2 \sigma_N^2 \lambda^2 \end{cases} \quad (6)$$

(6)式において、縞次数読取り誤差  $\sigma_N$  が  $8^\circ$  すなわち  $1/45$  縞である場合における値  $\sigma_{u_x}, \sigma_{u_y}, \sigma_{u_z}$  の範囲を Fig. 3 に破線で示した。はり中央部のところの計算結果は、  $\sigma_{u_x} = 0.070 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_{u_y} = 0.085 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_{u_z} = 0.026 \mu\text{m}$  である。実験値の変位のばらつきは、ほぼこの範囲内に納まっている。

本手法の特徴を利用すると、1方向照明3方向観察を用いた3次元変位測定の光学系における参照光部分の光学系が、コンパクトに一体化して作製できるようになる。したがって、複雑な形状をもった測定対象における影の問題がなくなる。光源にパルスレーザーを用いると、従来の方法では困難であった動的な物体の3次元測定が可能となると思われる。

## 5. む す び

ヘテロダイン・ホログラフィー干渉法を用いて、物体の3次元変位測定のための干渉計を試作して簡単な実験を行なった。四つの感度ベクトルをもつホログラムは、

1枚の小さな乾板上で4組のレーザービームの参照光により作製した。実験には、片持りの面の法線方向をホログラム法線方向と傾けて配置し、たわみの軸方向に沿った変位ベクトルの3次元測定を行ない理論値と比較した結果、定性的な一致を見た。今後、位相読取り精度に影響を与える諸要因の理論的および実験的な検討や装置の改良が必要であるが、一応の可能性が示されたと考える。

最後に本実験を行なうにあたり、高出力な  $\text{Ar}^+$  レーザーおよび防振設備の完備した実験室の使用を許可して下さい、多大なご協力をいただいた福井大学上田正紘教授に感謝いたします。なお本研究は、昭和59年度文部省科学研究費補助金 No. 59750071 の援助を受けていることを付記する。

## 文 献

- 1) E. B. Aleksandrov and A. M. Bonch-Bruевич: Investigation of surface strains by the hologram technique. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **12** (1967) 258.
- 2) J. E. Sollid: Holographic interferometry applied to measurements of small static displacements of diffusely reflecting surfaces. *Appl. Opt.*, **8** (1969) 1587.
- 3) K. Shibayama and H. Uchiyama: Measurement of three-dimensional displacements by hologram interferometry. *Appl. Opt.*, **10** (1971) 2150.
- 4) 斎藤弘義: ホログラフィー干渉法による変位の測定と応力、歪の解析. 応力と歪, **1** (1971) 19.
- 5) T. Matsumoto, K. Iwata and R. Nagata: Measuring accuracy of three-dimensional displacements in holographic interferometry. *Appl. Opt.*, **12** (1973) 961.
- 6) T. Matsumoto, K. Iwata and R. Nagata: Distortionless recording in double-exposure holographic interferometry. *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1660.
- 7) 本田捷夫, 中橋末三, 馬込伸貴, 辻内順平: 三次元変形計測のためのハイブリッド・ホログラフィー干渉法. 応用物理, **49** (1980) 279.
- 8) 中島俊典: ヘテロダイン干渉法. 光学, **9** (1980) 266.
- 9) 岩田耕一: 光ヘテロダイン法. *O plus E*, **2** (1982) 2.
- 10) R. Dändliker: *Progress in Optics*, Vol. 17 (North-Holland, Amsterdam, 1980) p. 1.
- 11) C. M. Vest: *Holographic Interferometry* (Wiley, New York, 1979) p. 67.