



動的測定のための高感度実体格子型モアレトポグラフィ法

新井 泰彦*・横関 俊介**・山田 朝治*

* 関西大学工学部機械工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

** 九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820 飯塚市大字川津 680-4

(1991年12月10日受付, 1992年4月8日受理)

High-Resolutive Shadow Moiré for Dynamic Measurements

Yasuhiko ARAI,* Shunsuke YOKOZEKI** and Tomoharu YAMADA*

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University,
3-3-35, Yamate-cho, Suita 564

** Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and
System Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Kawazu, Iizuka 820

(Received December 10, 1991; Accepted April 8, 1992)

This paper describes a new high-resolutive 3-D measurement method for a dynamic shadow moiré. The method is based on the principle of producing moiré fringes in the shadow moiré and on a fringe-scanning technique. The experimental apparatus includes three TV cameras, a microcomputer, a projector, and a grating. The dynamic measurement can be performed such that three pictures taken by three TV cameras simultaneously are processed by an iterative numerical procedure. Experimental results show that the measurement accuracy is obtained more than 1/40 fringe.

1. はじめに

1970年代初頭に Meadows¹⁾, 高崎²⁾らによって提案されたモアレトポグラフィ法 (以下, モアレ法) は, 非接触3次元測定技術として現在, 工学, 医学, 歯学, 服飾などの分野で広く用いられ³⁾測定の自動化とともに高感度, 高精度化が求められてきている. モアレ法の高感度化の一手法として縞走査技術⁴⁾の導入がある. この手法の導入に当たっては, モアレ縞の三つの未知数を決定するために最低3種類の位相の異なった縞を発生させ, それらの縞画像間で \tan^{-1} の演算によって縞の位相を求める必要がある. この方法は, 格子投影型モアレ法のように, 2枚の格子間に所要の位相差を持たせておき, その結果生じる数種類の所要の位相差を持ったモアレ縞間の演算によって位相を求める場合には有効である. しかし, 1枚の格子しか用いない実体格子型モアレ法では, 3種類の位相の異なった縞を発生させることは困難であり⁵⁾, また, モアレ位相シフト法により, さらに高感度を求めようとすると $\pi/2$ rad の周期性を持つ位相誤差^{6,7)}

が存在するなど実体格子型モアレ法における縞走査法の導入には, さまざまな問題があり, 一般にその導入は, 難しいと考えられていた.

このような問題に対して, 前報⁸⁾では, 縞走査法の照明むらの影響を除去できる利点を, 実体格子型モアレ法へ応用するとともに, 格子プロフィールの問題^{6,7)}をも考慮することのできる縞解析法を提案した. しかしながら前報の手法では, 画素ごとに高精度な位相検出を行えるものの, 位相シフトを時系列で与えるため実時間の測定は不可能であった. この問題を本報では, 空間的に分離した三つの縞を用いた信号処理により位相を測定する手法⁹⁾を新たに, 導入することによって, 前報の手法を動的に変化する物体の測定が可能な手法へと拡張し, 原理確認実験を通してその有効性を検討した.

本手法によって, 実体格子型モアレ法も容易に測定の高感度化がなされるとともに, 動的に変化する物体の測定も可能となり, モアレ法のより広い分野での利用が促されるものと考えられる.

2. 測定原理

Fig. 1 に示す光学系において, TV カメラにより検出されたモアレ縞の明暗分布 $I(x, z)$ は, (1)式として表すことができる⁸⁾.

$$I(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi d \cdot h}{s(h+l)} \quad (1)$$

ここで, $a(x, z)$, $b(x, z)$ は, 照明むら, 反射むらに対する係数であり, h は被測定量の縞深さである.

いま, 格子-TV カメラ間距離: l あるいは, TV カメラ-プロジェクター間距離: d , 格子ピッチ: s のいずれかを変化させると, (1)式に示すモアレ縞の明暗分布は変化する.

前報⁸⁾では, 格子-TV カメラ間距離: l を Δl , $-\Delta l$ だけ変化させた場合を考え, その明暗分布 $I(x, z; \Delta l)$ を, (2)式として表現し, $a(x, z)$, $b(x, z)$ の影響を除去するために, (3)式に示すような関数 $\eta(h)$ を定義し, その関数の $h(x, z)$ に対する根を Newton-Raphson 法¹⁰⁾ によって解法することにより縞深さ $h(x, z)$ を直接求めることを提案した.

$$I(x, z; +\Delta l) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi d \cdot (h + \Delta l)}{s(h+l)} \quad (2)$$

$$\eta(h) = \frac{I(x, z) - I(x, z; \Delta l)}{I(x, z; -\Delta l) - I(x, z)} \quad (3)$$

しかしながら, この手法では, $\pm \Delta l$ と格子を移動させねばならないため, 動的に変化する物体の測定は不可能であった. したがって, 本研究では, Fig. 2 に示すように, l を変化させるのではなく 3 台のカメラを用いることにより, d , $d + \Delta d_1$, $d + \Delta d_2$ の位置にカメラをそれぞれ設置し, (1)式に対して, (4), (5)式によって表される明暗分布を得ることによって, 3 種類の $h(x, z)$ に関する関係式を導出し, 前報⁸⁾に示した手法を動的に変化する物体の測定が可能なる手法へと拡張した.

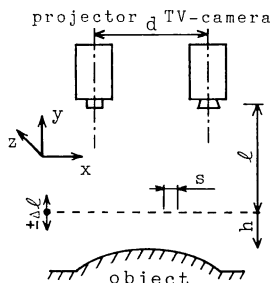


Fig. 1 Schematic diagram of the shadow moiré.

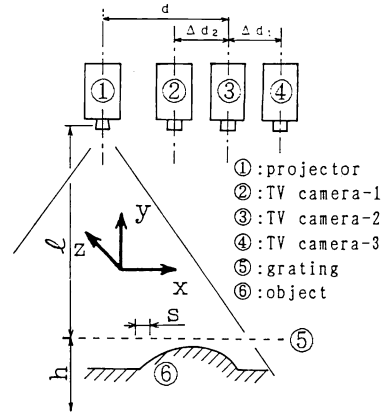


Fig. 2 Schematic diagram of a dynamic shadow moiré.

$$I(x, z; \Delta d_1) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi(d + \Delta d_1) \cdot h}{s(h+l)} \quad (4)$$

$$I(x, z; \Delta d_2) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi(d + \Delta d_2) \cdot h}{s(h+l)} \quad (5)$$

この(4), (5), (1)式を用いて前報同様に, (6)式に示すような関数 $\zeta(h)$ を定義し, その関数から縞深さ $h(x, z)$ を直接求めることにした.

$$\begin{aligned} \zeta(h) &= \frac{I(x, z) - I(x, z; \Delta d_1)}{I(x, z; \Delta d_2) - I(x, z)} \\ &= \frac{\cos \frac{2\pi d \cdot h}{s(h+l)} - \cos \frac{2\pi(d + \Delta d_1) \cdot h}{s(h+l)}}{\cos \frac{2\pi(d + \Delta d_2) \cdot h}{s(h+l)} - \cos \frac{2\pi d \cdot h}{s(h+l)}} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで, d に対して, $d + \Delta d_1$, $d + \Delta d_2$ の位置から検出した画像には, それぞれ視差がある. したがって, (6)式の演算を実行するためには, 以下に示す(7), (8)式に基づき 3 台のカメラ間の視差を除去しておかなければならない問題がある. 視差を表す関係式は,

$$W_1 = \frac{k \cdot \Delta d_1}{l + h_i} \quad (7)$$

$$W_2 = \frac{k \cdot \Delta d_2}{l + h_i} \quad (8)$$

である. ここで, W_1 , W_2 はそれぞれカメラ 2 に対するカメラ 1, カメラ 3 の視差を示し, $k = l \cdot f / (l - f)$ であり, f は, レンズの焦点距離である.

ところが, 3 台のカメラ間の視差を除去するためには, (7), (8)式に示すように, 格子と物体面上の測定点の距離が既知でなければならない. この問題に対して, 本研究では, Fig. 3 のフローチャートに示すよう

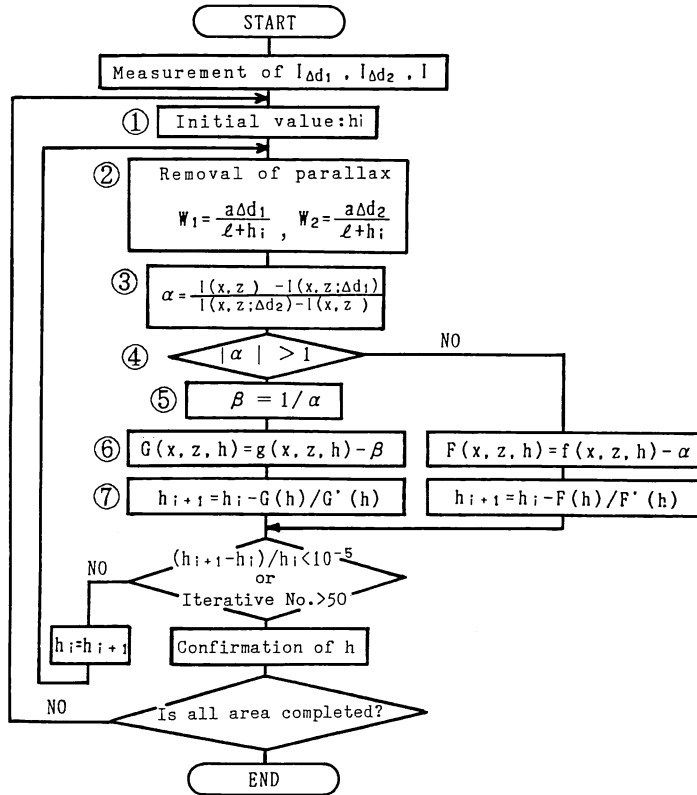


Fig. 3 Flowchart for numerical calculation of a dynamic shadow moiré.

な手法を用いた。

本手法では、(6)式と実験値とから Newton-Raphson 法によって $h(x, z)$ を求める場合、まずはじめに、フローチャートの①に示すように、初期推定値 h_i を設定した。この h_i により、3台のカメラ間の視差 W_1, W_2 を②に示すように演算し、(7), (8)式を用いてメモリ上の画像を W_1, W_2 に対応するドット数だけ左右に移動することによってカメラ2に対するカメラ1, 3の視差を除去した。この視差を除去された画像間で(6)式に示す関数に対応する値 α を③に示すように計算した。本手法においても、前報⁹⁾に示したように、 α の絶対値が1より大きいか、あるいは、小さいかによって、 $\zeta(h), \xi(h) (= 1/\zeta(h))$ の二つの関数を切り替えることにより Newton-Raphson 法における反復公式(9)式に基づき h_{i+1} を計算し、収束条件を満足するまで、フローチャートの②から⑦の演算を反復して行い縞深さ $h(x, z)$ を順次求めることにした。 $i+1$ 番目の縞深さ h_{i+1} は以下の式で記述できる。

$$F(h) = \zeta(h) - \alpha \quad (9)$$

ここで、

$$h_{i+1} = h_i - \frac{F(h_i)}{F'(h_i)} \quad (10)$$

であり、 F' は h についての偏微分を表す。

3. 結果と検討

Fig. 4 に $l = 1,650$ mm, $d = 185$ mm, $s = 2$ mm, $\Delta d_1 = 40$ mm, $\Delta d_2 = -40$ mm と設定された光学系で、光学基板の石膏レプリカによって作製した平面を傾けて測定した場合の3台のカメラから検出したモアレ縞の明暗分布の測定結果を示す。

Fig. 4 に示した断面 A-A' における本手法による演算結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(A)に示す Fig. 4 の A-A' の明暗分布において、照明むらの影響がバイアスに認められる。この明暗分布から求めた(6)式の $\zeta(h), \xi(h) (= 1/\zeta(h))$ に対応する実験結果を Fig. 5(B)に示す。 $\zeta(h), \xi(h)$ の切り替えがスムーズに行われていることが確認できる。Fig. 5(C)に A-A' の断面形状の演算結果を示す。この場合の収束に要する反復回数は、設定された初期推定値 h_i , (6)式に示す $\zeta(h)$ の傾き等に依存している。本実験では、測定点1点につき4回の反

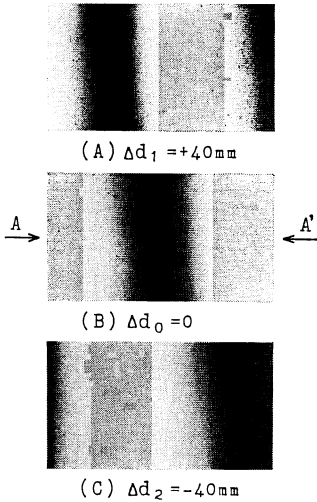


Fig. 4 Moiré fringes of a tilted plane object with different displacement Δd_s .

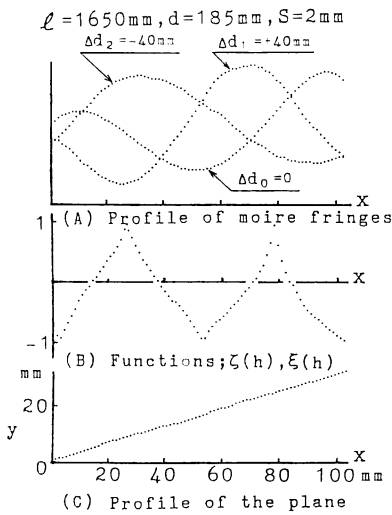


Fig. 5 Measured results of a tilted plane object with the help of functions $\zeta(h)$ and $\xi(h)$.

復で収束する場合は最も反復回数の少ないものであった。この場合に使用した計算機は日本電気社製 32 bit パーソナルコンピュータである。また、ソフトウェアは N 88 BASIC コンパイラによって構成されている。したがって、4 回の反復に約 1 s の演算時間を要した。しかし、一般的には、7~9 回の反復回数を必要とし、平均 2 s 程度の時間を要した。さらに、本手法では視差除去時の画像の左右への移動における視差の整数化 (ドット数への変換) において、ドット数の小数部分に対応する移動を行っていないため、2 ドット間で収束が振動的になることがあった。これらの現象が収束回数ならびに演

算結果に大きく関与していることもわかった。本研究では、このような場合には Newton-Raphson 法と同様に反復回数の上限 (50 回) を設定し演算の打ち切りを行った。このような場合、50 回の演算に約 30 s を要した。この処理による影響は Fig. 5 (C) に示す結果において、断面形状に小さな段差となって認められる。しかしながら、測定における rms 測定精度は、1/40 フリンジ以下であることが確認されている。

次に、ポスターカラーによって白く塗られた $\phi 80$ mm のスピーカーのコーン紙の形状測定結果を示す。この場合の測定条件は、 $l=1,650$ mm, $d=180$ mm, $s=2$ mm, $\Delta d_1=60$ mm, $\Delta d_2=-60$ mm である。また、使用した入力パルス信号は Fig. 6 に示すものである。Fig. 7 に振動していない場合の 3 台のカメラによるコーン紙のモアレ画像ならびに B-B' 断面の測定結果を示す。さらに、ここではシャッター速度 1/700 s の CCD カメラを用いているので、振動時のモアレ画像を 3 台のカメラにより、1/30 s ごとにあらかじめメモリに記録し、その後計算することによって動的に変化するコーン紙の形状を時系列で求めることができる。Fig. 8 (E) はパルス印加

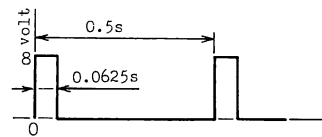


Fig. 6 Applied impulse signal used for speaker's excitation.

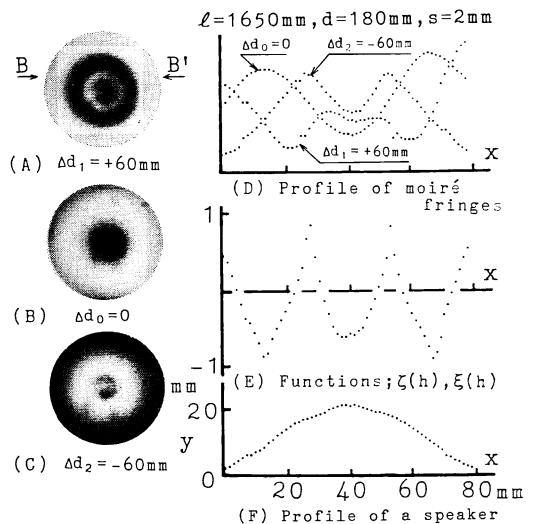


Fig. 7 Measured results of a shape of a speaker's cone paper without excitation.

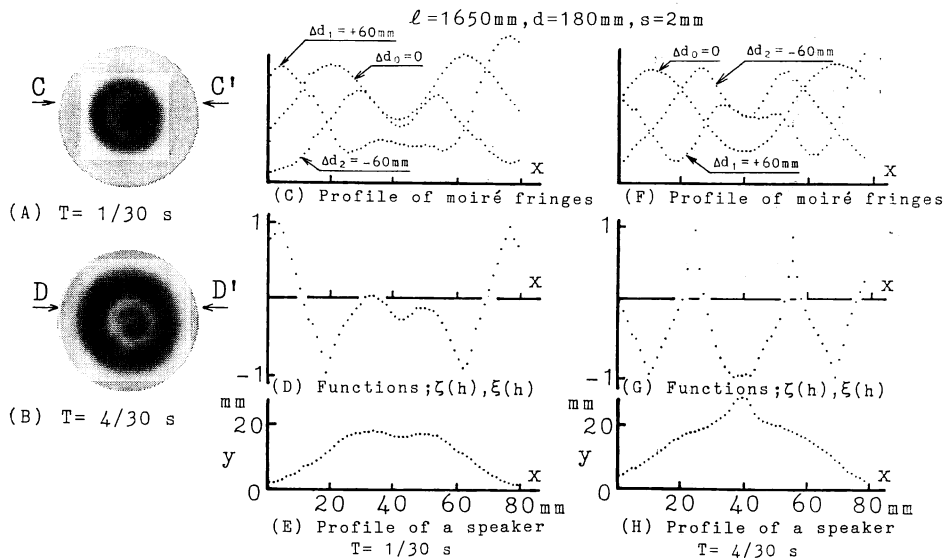


Fig. 8 Measured results of a shape of a speaker's cone paper with excitation.

後 $1/30$ s のコーン紙のカメラ 1 によるモアレ画像 (Fig. 8(A)) の C-C' 断面の測定結果である。中心部 (40 mm 付近) がパルスの立ち上がりにともない図の下方に押し出されているとともに周辺部が圧迫されている様子がうかがえる。一方, Fig. 8(H) は $4/30$ s 後の Fig. 8(B) に示すモアレ画像の D-D' 断面の形状を測定したものである。中心部がパルスの立ち下がりにともない図の上方に押し上げられている様子が確認できる。以上の結果は, 本手法が動的に変化する物体の測定も可能であることを示している。

4. おわりに

本研究における成果を以下に示す。

- 1) 従来困難であると考えられていた実体格子型モアレ法による動的に変化する物体測定の高分解能化を, 縞の位相を介して縞深さを求めるのではなく, 3 台の TV カメラを用いることにより, モアレ縞の発生原理に基づき, 行うことのできる手法を提案した。
- 2) 試作装置による原理確認実験において, 本手法の正当性を示すとともに, rms 測定精度が約 40 分の 1 フリンジであることを明らかにした。
- 3) スピーカーのコーン紙の測定結果は, 本手法が動的に変化する物体の測定を時系列に行えることを示している。

以上の結果より, 本手法が実体格子型モアレ法を用い

た 3 次元自動測定にきわめて有効な手法であることがわかった。

文 献

- 1) D. M. Meadows, W. O. Johnson and J. B. Allen: "Generation of surface contours by moiré patterns," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 942-947.
- 2) H. Takasaki: "Moiré topography," *Appl. Opt.*, **9**(1970) 1467-1472.
- 3) たとえば, モアレ研究会抄録: 画像技術, **7** (1976) 37-56.
- 4) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 5) 新井泰彦, 倉田忠雄: "縞走査法による格子照射型モアレトポグラフィの測定精度向上", *光学*, **18** (1989) 311-315.
- 6) 小松原良平, 吉澤 徹: "格子照射型位相シフト法による形状計測", 第 38 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 第 32 分冊 (1991) p. 802.
- 7) 石井行弘, 陳 軍, 小野寺理文, 江原克典, 中村泰三: "位相シフト法による半導体レーザーフィゾー干渉法とその誤差解析", 第 7 回光波センシング技術研究会講演論文集, LST 7-14, pp. 97-101.
- 8) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "実体格子型モアレトポグラフィ法の高感度化", *光学*, **21** (1992) 39-42.
- 9) 中橋末三, 一色真幸, 桑島茂純: "実時間縞画像解析システム", 第 52 回応用物理学会講演予稿集, 第 3 分冊 (1991) p. 812.
- 10) D. D. McCracken (森口繁一, 伏見正則 共訳): 科学技術計算 (共立出版, 東京, 1971) pp. 47-56.