



モアレ縞プロフィールの高調波成分を考慮した shadow moire の高精度化

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

(1994年12月6日受付, 1995年2月16日受理)

Improvement of Measurement Accuracy in Shadow Moire Considering Higher Harmonics in Moire Profile

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 6, 1994; Accepted February 16, 1995)

A method for high resolution three-dimensional shape measurement has been proposed for a shadow moire system. To increase resolving power, the problem caused by higher harmonics should be discussed and solved. It is well known that moire fringes in shadow moire have a nonsinusoidal profile leading harmonics distortions. In this paper, the influence of the higher harmonics in moire profile into the measurement accuracy in the method is discussed. Then, the method is improved for removing the error produced by the higher harmonics in moire profile. Both simulational and experimental results are shown that the improved method can effectively reduce the influence by the higher harmonics.

1. はじめに

1970年代初期に Meadows¹⁾, 高崎²⁾らによって提案されたモアレトポグラフィは, モアレ縞を用いた非接触3次元形状測定法である。現在まで20年を経過する中でさまざまな技術が提案され, 実用化されてきている^{3,4)}。なかでも, projection moire⁵⁾に端を発する干渉縞の縞解析技術として発達したサブフリンジ法⁶⁾の導入は, 高精度, 高感度という面においてモアレトポグラフィの技術を大きく変化させたものであるといえる。現在では, projection moireに限らず⁷⁾ shadow moire⁸⁾においてもこれらの技術は縞と縞との間を数十分割することのできる技術として利用されている。

ところが, 縞の自動化, 高分解能化のためのこれらの技術にはさまざまな問題が指摘されるようになってきて

いる。その一つにバイナリ格子によるモアレ縞のもつ宿命とでもいえる高調波成分の問題がある。モアレトポグラフィの開発当初は縞の形状をいかに検出するかが問題となっていたため, 検出されたモアレ縞プロフィールに対して『モアレ縞の振幅は, 原格子を構成する周波数成分のその2乗であるため, 高周波成分は急速に減衰し, 全体的な強度変化は最低周波数に依存する』といった議論⁹⁾がなされるだけで, モアレ縞プロフィールの高調波成分の影響については十分に議論されることはなかった。ところが, モアレ縞プロフィールを用いて縞の数十分の1までの測定を行おうとする場合には, すなわち, モアレトポグラフィに縞走査¹⁰⁾等のサブフリンジ法を導入しようとするときには, 数%の高調波成分が測定誤差の要因となってきている。したがって, 高精度, 高分解能な測定技術としてモアレトポグラフィを扱うためには, 当然

高調波成分の影響は議論されるべきものであり、解消されなければならない問題である。

しかしながら、モアレトポグラフィへのサブフリンジ法の導入は干渉縞の解析技術として発達した技術をそのままモアレ縞の解析に導入したに過ぎないため、モアレトポグラフィがもつ独特の問題(例えば、縞次数の問題¹¹⁾あるいはここで取り扱う高調波の問題など)を考慮して処理することができないのが現実であった。このような状況に対して、積極的にモアレ縞を扱うことを目的としたモアレトポグラフィの解析技術^{8,12)}が提案されるに至り、モアレ縞の高調波成分を議論することが可能になってきている。

本研究では、前報¹²⁾に示した shadow moire の縞解析法におけるモアレ縞プロファイルの高調波成分の測定精度への影響を調べ、この問題の解決法を提案するとともに、新しく提案した手法の特性、また問題点について検討した。このような議論を行うことによって初めてモアレトポグラフィにおけるサブフリンジ解析の精度の検討ならびにサブフリンジ法の論理的な適応が可能になると考える。

2. 原理

Shadow moire に対するサブフリンジ法の適応は、shadow moire が1枚の格子を用いて測定を行う⁹⁾ために一般に困難であると考えられていた。これに対して、前報^{8,12)}では従来の縞走査法^{5,6,10)}が \tan^{-1} 関数という三角関数の特別な関係を用いているためにこれらの問題が発生していることを示し、より一般的な関数を用いることによって上記の問題を解消する手法を示した。特に、3台のカメラを用いた手法¹²⁾ではダイナミックに変化する現象をもとらえることができることを示し、shadow moire の広い分野での利用の可能性を示すことができた。

2.1 一般関数を用いた shadow moire の縞解析¹²⁾

Fig. 1 に示すように、shadow moire において3台のTVカメラを利用することによって、式(1)~(3)に示すモアレ縞画像を同時に検出することができる。

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

$$I_{d_1}(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos\left(\frac{2\pi h(d + \Delta d_1)}{s(h+l)}\right) \quad (2)$$

$$I_{d_2}(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos\left(\frac{2\pi h(d - \Delta d_2)}{s(h+l)}\right) \quad (3)$$

$$F(x) = \frac{I(x, z) - I_{d_1}(x, z)}{I_{d_2}(x, z) - I(x, z)}$$

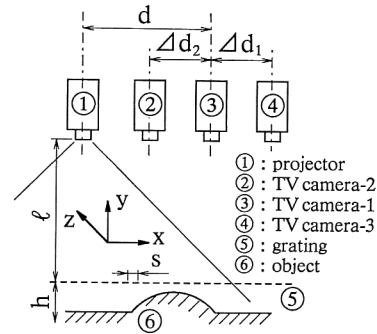


Fig. 1 Schematic diagram of optical system of shadow moire with 3 TV cameras.

$$= \frac{\cos\left(\frac{2\pi dh}{s(h+l)}\right) - \cos\left(\frac{2\pi h(d + \Delta d_1)}{s(h+l)}\right)}{\cos\left(\frac{2\pi h(d - \Delta d_2)}{s(h+l)}\right) - \cos\left(\frac{2\pi dh}{s(h+l)}\right)} \quad (4)$$

ただし、 $a(x, z)$, $b(x, z)$ は、モアレ縞プロファイルのバイアスならびにコントラストに関する係数である。ここで、モアレ縞画像 $I(x, z)$ からバイアス成分を取り除いたモアレ縞の強度分布の比として、ratio function: $F(h)$ を式(4)として定義する。この $F(h)$ は従来の縞解析における \tan^{-1} 関数に相当するもので、 \tan^{-1} よりも一般的な形をした縞解析のための関数である。

$$F(h) = \alpha(x, z) \quad (5)$$

この関数 $F(h)$ を式(5)に示すような非線形方程式と考えると、数値演算(前報では、Newton Raphson 法¹³⁾を用いた)を用いて縞深さ h を直接解くことができる。ただし、式(5)における $\alpha(x, z)$ は測定結果より求めた $F(h)$ に相当する実測値である。

以上のように、前報¹²⁾に示した手法では従来の縞走査法のように縞の位相を介して縞深さ h を求めるのではなく、直接縞深さ h を求めることができる。この結果、shadow moire においても縞と縞との間を数十分の1に分割して測定が行えるようになった。

2.2 モアレ縞プロファイルにおける高調波の問題

空間的な分解能を上げるために、当初用いていた 256×256 pixel のTVカメラ¹²⁾から 512×512 pixel のTVカメラにシステムを変更すると、形状測定を行った際に決まった場所(決まった縞深さ)で測定結果に歪が観測されるに至った。この場合、システムの変更にもなう現象として、モアレ縞プロファイルが正弦波というよりも三角波に近い波形となっていることがわかった。この問題は、モアレ縞を検出するTVカメラのpixelが小さくなったことによってモアレ縞プロファイルの空間的平均化が行われる面積が小さくなり、高い周波数成分までも

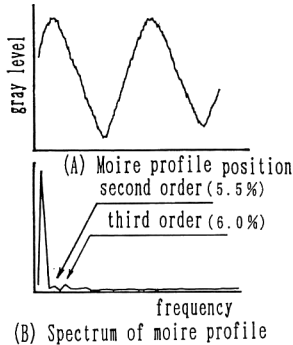


Fig. 2 Frequency analysis of moire profile.

解像できる画像検出システムへと変更されたことに起因すると考えられる。例えば、Fig. 1に示す shadow moire のシステムの中央のカメラ (カメラ 1) の出力を FFT によって周波数解析すると、Fig. 2に示すように 1 次の周波数成分に対して、2次、3次、さらに高次の成分が存在することが確認できる。また、それぞれに位相をもつことが確認できた。これらの高次の周波数成分は通常の測定範囲ではほぼ同じ値であることからシステム固有のものであると考えられる。

ここで検出された 2次、3次の成分は 1 次の成分に対して 5~6% 程度に過ぎないものの、実際には Fig. 2(A)に示すようにモアレ縞プロフィールを三角波状に変形している。そこでまず始めに Fig. 2(A)に示す高調波成分を含むモアレ縞プロフィールを計算機内部で合成し、そのモアレ縞プロフィールに対してデジタル計算機による縞解析のシミュレーションを行い、モアレ縞プロフィールに含まれる高調波成分の影響を検討し、その解決法を考えることにした。

3. 結果および検討

3.1 シミュレーション結果

Fig. 1に示すシステムにおいて、 $l=1300$ mm, $d=230$ mm, $s=2$ mm, $\Delta d_1=\Delta d_2=30$ mm と設定し、格子面に対して 14 度傾きをもたせた平面 ($\tan 14^\circ=0.25$) に対してのシミュレーション結果を Fig. 3に示す。

Fig. 3(A)に 3台のカメラから検出されたと仮定した画像のシミュレーション結果を示す。これらの画像はあらかじめ実験によって得られた結果にもとづき、2次、3次の高調波成分がそれぞれ 5% 含まれるように、また、2次の高調波成分の位相は π rad ずれていることが確認されているので、位相の処理も行われたシミュレーションのためのモデル画像であるといえる。次に、これらの画像を用いて前報¹²⁾に示す解析法にしたがって解析した

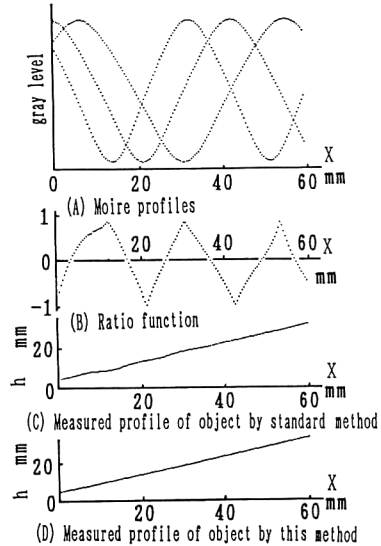


Fig. 3 Simulational results of fringe analysis concerning to moire profiles with higher harmonics.

結果を Fig. 3(B), (C)に示す。Fig. 3(B)は、式(4)に示すバイアス成分を取り除いたモアレ縞の強度分布の比に対応する結果を示している。Fig. 3(C)は、Fig. 3(B)に示す結果を用いて、式(5)に示すような非線形方程式の解として求めた平面の形状である。ここで、 x 方向の 15 mm 付近 (縞深さとして 10 mm 付近) で形状測定結果が歪められていることが確認できる。そこで前報に示した、また、式(1)~(3)に示したモアレ縞プロフィールを正弦波として解析するのではなく、Fig. 2にみられるように、成分として比較的大きな値をもつ 3次の高調波成分までを式(6)に示すように考慮して、前報同様に解析を行った結果を Fig. 3(D)に示す。

$$I(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \left\{ A_1 \cos \left(\frac{2\pi h d}{s(h+l)} \right) + A_2 \cos \left(2 \frac{2\pi h d}{s(h+l)} \right) + A_3 \cos \left(3 \frac{2\pi h d}{s(h+l)} \right) \right\} \quad (6)$$

ただし、 A_1, A_2, A_3 は、1, 2, 3次の各周波数成分に対する係数である。また、シミュレーションでは前述のモデル画像を用いているので、各係数はそれぞれ $A_1=1.0$, $A_2=A_3=0.05$ が設定されている。

Fig. 3(D)では(C)でみられるような歪が解消されていることがわかる。この(C), (D)の誤差を Fig. 4に示す。

Fig. 4(A)は Fig. 3(C)の結果における誤差であり、 $x=15$ mm 付近で誤差がみられる。これは高調波成分によるものであり、Fig. 4(B)に示す Fig. 3(D)の誤差解析結果では誤差を ± 0.02 mm 以下に抑えることができ

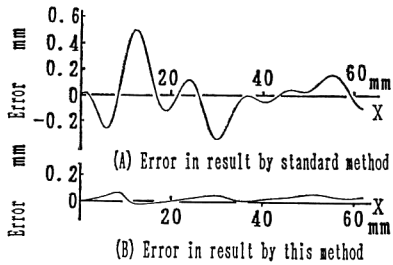


Fig. 4 Comparison with errors in simulational results.

いる。この誤差は数値解析法としての Newton Raphson 法における数値演算時の誤差であると考えられる。この結果より、明らかにモアレ縞プロフィールに含まれる高調波成分が形状測定結果において測定誤差となっていることがわかる。また、モアレ縞プロフィールの高調波成分を考慮することによってこれらの問題は解決できることが確認できる。

以上の結果にもとづき、Fig. 1 に示すシステムにおいて実験を行い、上記のシミュレーション結果同様の効果がみられるかを次に調べた。

3.2 実験結果

Fig. 1 に示すシステムに沿って、シミュレーションと同じパラメータで実験を行った。Fig. 5 に 3 台のカメラによって検出した 3 枚のモアレ縞画像を示す。A-A' 断面における演算結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6(A) に、3 台のカメラにより検出したモアレ縞画像を示し、Fig. 6(B) に、それらの結果から求めた式 (4) 中のバイアス成分を取り除いたモアレ縞の強度分布の比に対応する結果を示す。さらに、Fig. 6(C) は、Fig. 6(B) に示す結果を用いて式 (5) のような非線形方程式の解として求めた平面の形状である。Fig. 6(C) においても、Fig. 3(C) に示すシミュレーション結果同様に、モアレ縞プロフィールが正弦波であるものとして解析した標準的な手法では $x=15$ mm 付近で大きく形状が歪んでいることがわかる。

一方、シミュレーション同様に、比較的大きな値をもつ 3 次高調波成分までを考慮にいられた処理*1を行った Fig. 6(D) ではこれらの問題が緩和されていることが確認できる。Fig. 6(C), (D) の結果を Fig. 4 と同様に誤差として示したものが Fig. 7 である。

*1 3 台の TV カメラより得た画像の 3 次までの高調波成分はいずれの場合も 5% 程度であったことより、実験ではすべての高調波成分の割合を 5% として行った。ただし、2 次高調波成分の位相はシミュレーションにおいて示したように π rad ずれていたため位相の処理も行った。

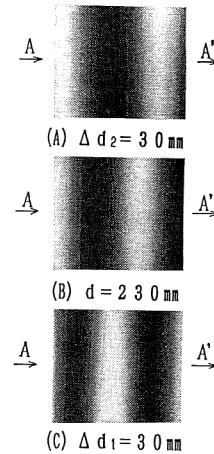


Fig. 5 Moire fringes by 3 TV cameras.

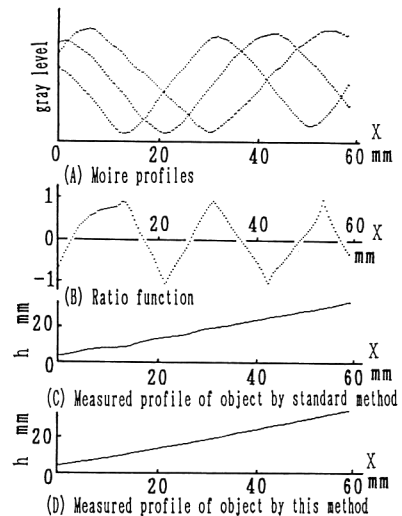


Fig. 6 Experimental results of fringe analysis concerning to moire profiles with higher harmonics.

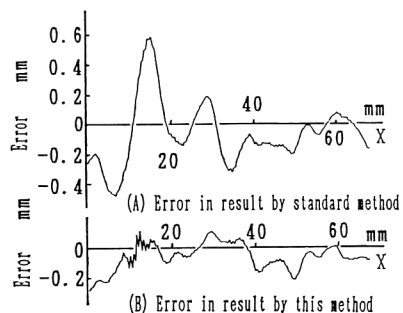


Fig. 7 Comparison with errors in experimental results.

Fig. 7(A) は定量的には幾分値が大きいものの、定性的には Fig. 4(A) に非常に一致した結果となっている。一方、Fig. 7(B) は Fig. 4(B) に比べて大きな誤差として検出されている。これは、実際のシステムでは4次、5次などさらに高次の高調波に対する成分が存在しているためであると考えられる。しかし、Fig. 7(B) において測定誤差の標準偏差は、0.16 mm であり、モアレ縞の深さ方向に対する縞の間隔が約 10 mm であることから考えると、約 60 分の 1 wave の範囲での測定が実現しているといえる。しかしながら、より精度の高い解析を行う場合には、より高次の成分をも考慮にいれた解析が必要であることがわかる。

以上の結果より、モアレトポグラフィにおいてモアレ縞プロフィールがもつ宿命とでもいえる高調波成分の問題も、モアレ縞を処理するために開発した手法を用い、かつ、高次の成分を考慮することによって十分に緩和できるものと考えられる。

4. ま と め

本研究では前報に示したモアレ縞を処理するための解析法の改善を以下に示すように行い、測定精度の向上を図った。

(1) Shadow moire におけるモアレ縞プロフィールに含まれる高調波成分を周波数分析によって解析し、それらが測定精度に影響を与えることを示した。

(2) Shadow moire の高精度化を図るための手法として高調波成分を考慮にいれた手法を示し、シミュレーションならびに平面を測定物体とした実験において新しく提案した手法が有効であることを示した。

(3) モアレ縞の深さ方向に対するピッチが約 10 mm

の shadow moire システムにおいて、モアレ縞プロフィールが正弦波であると考えた標準的な処理法にもとづく結果に比べて、新しく提案した手法では、PV 値で 1/3 (絶対量として 0.25 mm 以下)、標準偏差として 1/2 (絶対量として 0.16 mm 以下) の測定誤差に改善されていることを示した。

文 献

- 1) D.M. Meadows, W.O. Johnson and J.B. Allen: "Generation of surface contours by moire patterns," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 942-947.
- 2) H. Takasaki: "Moire 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) 吉澤 徹: "モアレ三次元計測", 光技術コンタクト, **29** (1991) 421-428.
- 5) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (Wiley Interscience New York, N.Y., 1992) pp. 653-686.
- 6) 谷田貝豊彦: "光干渉計測法の最近の進歩", 精密機械, **51** (1985) 695-702.
- 7) 新井泰彦, 倉田忠雄: "縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法", 光学, **15** (1986) 402-406.
- 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) 吉野洋一: "投影型モアレ等高線図化法", 光学, **1** (1972) 128-134.
- 10) 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.
- 11) 新井泰彦, 阿波啓造, 倉田忠雄: "走査モアレ法の縞次数自動決定法", 精密工学会誌, **52** (1986) 900-904.
- 12) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "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", 光学, **21** (1992) 464-468.
- 13) 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.