格子移動機構によるしま走査モアレ装置*

黒河治久** 市川直樹*** 矢島信之†

Fringe Scanning Moiré System using
Mechanically Controlled Grating

Haruhisa Kurokawa, Naoki Ichikawa and Nobuyuki Yajima

A measuring system was developed to test surface flatness of a large panel for space use. A fringe scanning moiré method was adopted for the system and high measuring accuracy and short sampling time was realized. A linear drive mechanism was used to move the grating by 25 μm for the fringe scanning. The deformation of the panel caused by heat in space was simulated using honeycomb panel (1.5m X 1.0m) and a computer controlled heat source. The deformation caused by temperature difference between front and rear surface was measured by the moiré system.

Key words: flatness measurement, moiré topography, fringe scanning

1. はじめに

近年、人工衛星が大型化するに従い、搭載される機器として、宇宙望遠鏡や大規模アンテナなどのように大型で高精度の構造を必要とするものが計画されている。熱環境の厳しい宇宙で、軽量構造の形状精度を保証するためには、あらかじめ地上で熱変形などを評価する必要がある。

地球資源探査衛星 (ERS-I) は、リモートセンシングのための人工衛星で合成開口レーダ (SAR) を搭載している (図1)。このSARは8枚のパネルを軌道上で展開して約2m X 12mの平面アンテナとするもので、面の精度として理想平面から $\pm 10\text{mm}$ 以内にあることが要求されている。本レーダアンテナは軌道上では形状の制御ができないため、地上で変形を予測実験する必要がある。レーダアンテナの変形は、初期形状誤差と展開による変形、熱流入や外乱トルクによる変形などがある。本研究は主として温度による形状変形の評価実験に適用することを目的としている。

Fig. 1 Earth Resource Satellite (ERS-I)
and Synthetic Aperture Radar (SAR)

形状測定としては、アンテナを構成するパネル1枚ごとの測定を重ね合わせて全体を推定することとすると、約2m X 2mの面につき1mm以下の分解能が要求される。熱流入を制御して行う熱変形実験では非接触測定が望ましく、対象が周期的に変形するので1分以内の測定周期が要求される。

面の変形の非接触測定として、対象に金属片や反射体を必要とする非接触変位センサの利用や、センサの移動による順次測定などは、本実験に適さない。

画像計測のうち、ホログラフィなど波面光学に基づく計測法は本研究の要求仕様に対し分解能が高く、振動のない環境を要するため、幾何光学的方法を採用した。幾何光学的測定では、モアレトポグラフィ (以下

* 原稿受付 平成元年11月27日。昭和62年度精密工学会秋季大会 (昭和62年10月12日)、昭和63年度精密工学会春季大会 (昭和63年3月16日)、1989年度精密工学会春季大会 (平成元年3月24日) にて発表

** 正会員 機械技術研究所 (つくば市並木1-2)

*** 機械技術研究所

† 宇宙科学研究所 (相模原市由野台3-1-1)

モアレ法という)は処理なしに等高線が得られ、その場で形状を観察するのに適しているが、基本構成では所要の分解能が得られず、データ処理に適さない。光切断法や格子投影法は¹⁾²⁾、計算機によるデータ処理を前提として、光学系が簡単にできる特長があるが、本研究では測定対象が平面であるため、光学的に処理を行うモアレ法が有利となる。

モアレ法を使う場合には分解能向上が必要であり、種々の方法が考案されている³⁾⁴⁾。フーリエ変換法や空間しま走査法などは多数の画素数を要し、光量を面内で一定にする必要がある。しま走査法 (fringe scanning) は走査時間が必要であるが、光学的に処理された像を1点ごとに計測処理できるため、光学系と処理系を簡素化できる。しま走査の実現方法にも、受光側格子としてTVカメラの走査線を使い、走査線の間引きによりしま走査を実現するもの⁵⁾⁶⁾、変形格子の写真と基準格子を重ねて走査するもの、格子を移動させるもの⁷⁾⁸⁾などがある。

本研究では、光学系によってモアレじまを形成し、分解能などを確保するために、格子を直動台に載せてしま走査を行った。また、データ処理はすべて計算機で行った。その結果、仕様を満足する測定分解能と速度を得た。この装置にパネル温度を制御する装置と模擬のアンテナパネルを組み合わせ、熱変形実験を行い、有効性を確認した。装置の方式、製作、評価、実験について報告する。

2. 装置の原理と構成

2.1 しま走査法の原理

図2が投影型モアレ装置の構成で、開発した装置の諸元は図中に示した。2mの距離から計測した場合、測定対象の大きさは1m×1m、等高線間隔は約5mmである。

被測定物の凹凸形状を $z(x,y)$ とすると、モアレ画像の輝度 $g(x,y)$ は、

$$g(x,y) = A(x,y) + B(x,y)q(\phi(x,y)) \quad (1)$$

と表せる。ここに、 $q(\phi)$ は周期関数であり位相 ϕ は、

$$\phi(x,y) \approx 2\pi(a/b^2P)z(x,y) \quad (2)$$

である。背景光や測定のノイズ等の分布(A)やモアレじまのコントラスト(B)、および関数 q は x,y 面内で一定とは限らない。

ここで、一方の格子を格子面内で格子に直交する方向に ξ だけ移動させると、得られる画像は、

$$g(x,y;\xi) = A + B \cdot q(\phi(x,y) + 2\pi\xi/P) \quad (3)$$

となる。基準関数との相関や、フーリエ分析により位相 ϕ だけを抽出することにより、形状 z が得られる。

Fig. 2 Optical system configuration and specification of the developed moiré system

この手法をしま走査法という。

位相は、格子の1ピッチを N 等分した $\xi_i (= iP/N)$ ごとに画像を計測し、以下の計算式で求める。

$$\phi = \tan^{-1}(s/c) \quad (4)$$

$$c = \sum_{i=0}^{N-1} g(\xi_i) \cos \frac{2\pi i}{N}, \quad s = \sum_{i=0}^{N-1} g(\xi_i) \sin \frac{2\pi i}{N} \quad (5)$$

N を何点とるかは、関数 g の高次フーリエ成分の大きさに依存する。つまり、要求される分解能に対し、折返し誤差が無視できるサンプル数を取ればよい。

2.2 装置の構成

装置は投影型モアレ装置に格子移動機構とTVカメラ、画像処理装置を付加してしま走査モアレ装置としたものである。主な仕様を表1に、受光側光学系の写真を図3に示す。

Table 1 System specification

Optical system	Lens : Fujinon W 1:5.6 / f 150 TV Camera : WV-1550 (Matsushita) Lamp : Halogen 300W Grating : 81mm x 81mm 0.1mm/pitch
Linear stage	Actuator : 10nm/pulse Inchworm EN-500 & CE-1000-1A (Burleigh Instruments) Linear encoder : 1 μ m resolution MT-10 & VRZ-105 (Heidenhain)
Processing system	Computer : PC-9801VM (10MHz) Video memory : 256 x 256 x 8bit DI/O + RAM(8 MB)

Fig. 3 Optical system and control mechanism of the grating

Fig. 4 Linear stage of the grating

格子移動機構では、受光側格子を直動台に載せ、デジタル入出力を介してコンピュータに接続された直動アクチュエータと直線変位計によって、格子変位(ξ)を分解能 $1\mu\text{m}$ で設定する(図4)。直動台には直動からの偏りを防ぐため、平行板ばね機構を採用した。

画像処理装置は、格子を1ピッチ移動させる間に複数の画像データを取得し、各点ごとに数値処理する。

3. 基本実験と結果

3.1 格子直動の変動

本装置の受光側格子は図4のように直動アクチュエータと変位計によって、 ξ 方向に制御される。格子が直動に伴い対物レンズ方向(ζ)に移動すると、格子ピッチ変動に相当する誤差を生ずる。平行板ばね支持の特性としては、 ζ 軸方向の変位およびそれに起因する η 軸および ζ 軸の回りの回転が優位と考えられるので、それらの測定のみを行い、 ζ 軸回りの回転の測定は行っていない。

ダイヤルゲージにより格子を取り付けた棒の3点(図4のP,Q,R)の ζ 軸方向の変位を測定した(図5)。棒が平面で、格子面と棒が平行であることを仮定して

Fig. 5 Deflection of linear stage movement

いる。測定結果はヒステリシスを持つが、再現性がよく、 η 軸まわりの回転が支配的である。しま走査時には ξ を $+$ 方向に移動制御しながら画像入力を行うので、1測定周期内での ζ 方向の変動は $5\mu\text{m}$ 以下であることが確認できた。これを格子幅の変動に換算すると、1.3%に相当する。後の結果とあわせると、直動の変動による誤差は測定分解能以下である。

3.2 しま走査波形と波形成分

対象として白色塗装の平面板を使い、一般的な特性を測定した。まず、平面の1点で ξ を $1\mu\text{m}$ 刻みで位置決めししま走査波形 $g(\xi)$ を測定した。雑音除去のために、サンプル平均し、バイアス分(式(1)のA)を除去した一例が図6である。

この波形の振幅がモアレじまのコントラストであり、数値処理のためには十分なコントラストが必要である。測定面上でのコントラストの空間分布を測定した(図7)。周辺ではモアレじまのコントラストが低下する。以下の実験は、図と同じ設定($b=3.0\text{m}$, F5.6)で行った。

しま走査のサンプル数を決めるために、波形の成分として、面内の各点での基本波、2倍波、3倍波の振幅と位相差を求めた(図8)。基本波の位相を0として、モアレ波形を次式で表す。

Fig. 6 A sample wave form of a moiré function $g(\xi)$

Fig. 7 Contrast of moiré fringes
Average of 128 samples. ($b=3000\text{mm}$)

$$g(\xi) = C_0 + C_1 \cos(\xi) + C_2 \cos(2\xi + \phi_2) + C_3 \cos(3\xi + \phi_3) + \dots \quad (4)$$

図から, C_1 が小さな画面周辺を除き, $C_2/C_1 < 0.1$, $C_3/C_1 < 0.06$, $\phi_2 \approx 0.0$ である。つまり, 3倍波以上を無視して画像枚数4枚で測定しても精度を保證できる。

3.3 測定感度と精度

白色塗装の小平面を光軸方向 (z 方向) に 0.25mm 単位で移動させて測定し, 測定感度つまりモアレじま等高線の間隔を求めた。各 z で16回計測し, 平均と標準偏差および平均値の回帰直線を求めた (図9)。図(b)で回帰直線の傾きを感度 (モアレ等高線間隔), すべての点での平均 $\pm 3\sigma$ が平行な直線で包含される範囲を精度と決める。平面上の各点で同じ実験を行い, 感度と精度を算出した (図9(c))。精度は画面中心部 (図(a)A付近)で等高線間隔 (位相にして 2π) の0.027倍, 周辺付近 (図(a)J付近)で約1/10である。

図9では, 感度は面内で一定ではない。モアレの等高線間隔の違いは, 一つにはしま次数の違いで生ずる。つまり, 測定点がモアレの同一等高面に無い場合, 等高面が傾いている場合などが考えられる。実験の設定では理論的には, しま次数 0次から10次で等高線間隔は 7.62mm から 7.98mm に変化する。

レンズひずみによっても感度は変化する。本装置では近接距離での測定のため広角レンズを使用していて, 光学系のひずみは無視できない。同系列のレンズのひずみ量で計算すると理想平面の測定で4本程度のモアレじまが生ずる。これに伴って同一平面上でも感度が変化する。

ただし, 実験値のばらつきは以上の2つの見横より

(1) 2nd elements

(2) 3rd elements

$$\text{where } g(\xi) = \sum_{i=0}^{100} C_i \cos(i\xi + \phi_i), \quad \phi_1 = 0$$

Fig. 8 Sinusoidal elements of moiré function $g(\xi)$
Distribution of 8×8 samples of the flat panel, $b=3000$

(a) Measured points

(b) Measured phase and deviation (σ)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
8.14	8.49	8.01	7.93	7.74	7.59	8.36	7.97	7.93	8.63
0.027	0.028	0.029	0.028	0.057	0.049	0.050	0.043	0.091	0.10

(c) Fringe distance (mm) and accuracy (6σ /fringe distance) at the points.

Fig. 9 Sensitivity and accuracy of measurement. Each point is moved by 0.25mm step and phase is measured 16 times.

大きく, なお他の要因が存在していると考えられる。

3.4 再現性

白色塗装面の測定を128回行い, 平均と標準偏差 σ を求めた (図10)。測定面の周辺ではコントラスト低下のために標準偏差が大きい。再現性として $\pm 3\sigma$ の範囲を考えると, ほぼ全域で等高線間隔の $1/30$ が得られた。これは, 変形量が小さく, 感度補正が可能な場合の測定精度であり, $1.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ の平面につき約 0.3mm である。

3.5 測定手順と測定時間

熱変形測定などの現実の測定に利用するためには, 測定時間, 記録容量などを考慮しなければならない。未処理の生データをすべてメモリー上に保存する方法や, 処理しながらディスクに記録する方法などがある。

Fig. 10 Measurement of a white panel and their deviation ($b=3000\text{mm}$)

Table 2 Sampling rate and amount of measurement

Processing time			
Input of 4 Images	1.6 s		
Calculation of phase	12.0 s for 128 x 128 pixels		
	3.0 s for 64 x 64 pixels		
Examples of measurement			
	Pixels	Sampling Rate (s)	Max Samples
(1) Data acquisition without processing	256 x 256	1.6	32(8MB)
(2) With processing	128 x 128	13.6	60
	64 x 64	4.6	1024
(3) Average of 4 times measurement with storing the results on the disk	128 x 128	60.0	128(16MB)

Fig. 11 Experiment system for measurement of thermal deformation of space panel
Position of the points in the x-y coordinates are, A(75mm, 55mm), B(75mm, 470mm) and C(75mm, 890mm).

基本処理の時間と代表的な測定例を表2に示す。測定例(1) (1.6秒周期)は対象によっては実時間測定とみなせる速さである。また、例(3)は次章の実験に用いたものである。

4. 熱変形模擬実験

本装置を利用した実験について概要を説明する。

4.1 熱流入制御

衛星は96分周期で地球を回り、太陽の光を受けたり地球の陰に入るため、熱環境の変化がある。アンテナの熱変形の要因は、①全体の温度変化によるバイメタル効果と、②表裏温度差による熱膨張差の変形、の2つが考えられる。このうち②を地上で模擬するための実験装置を製作した(図11)。熱制御は4本の赤外線ヒータ、パネルの表裏にはり付けた熱電対および赤外線温度測定装置によって行われる。熱による変形をしま走査モアレ装置によって測定する。実験にはアルミハニカムをCFRPではさんだ1m×1.5mの模擬パネルを使用した。

4.2 平面変形測定

模擬パネルの表面(CFRP)は黒色で反射が大きく、反射特性は場所や面の傾きに依存して変動する。そのまま測定した場合、空間平均処理をしても誤差が大きに残ったため、熱的条件にあまり影響しない程度の白色塗装をパネルに施した。

測定感度補正のために基準の3点(図11A, B, C)に変位を与え測定を行った。図12に測定結果と回帰直線、その傾きから求めた等高線間隔を示す。測定結果は回帰直線が原点を通るように図示した。前章の実験結果と同じく、場所による感度の違いが現われている。

同じ設定で、表裏温度差0.2~1.7℃、20分周期の熱制御サイクルを作り、模擬パネルの変形の画像計測を行った。熱制御の4周期目から定常と見なし測定を開始し、3周期の測定後に加熱を停止した。2時間後に再度形状測定を行い、それを初期形状として変形の原点にとった。測定処理は表2の測定例(3)に従った。図13に表裏温度差および前記3点での変位を示す。この結果を表裏温度差で整理し、回帰直線を求めた(図14)。

Fig. 12 Measurement of 3 points for calibration
Sensitivity = 2π (Displacement) / (Moiré phase)

Fig.13 Thermal control experiment and deformation of the honeycomb panel

Fig.14 Arrangement of the data on the figure 13

Fig. 15 Maximum deformation of the panel (time = 10 min of the figure 13): Deformed shape is calibrated by the coefficient for the point B.

温度差と変形量は概ね比例している。

最大変形時の変形測定結果が図15である。全面を点

Bの補正值で補正した。中心付近の局所変形は光の全反射による測定誤差である。自由端の上方(A付近)の湾曲は予想より大きく、熱制御の不均一のためかその他の問題によるものかは検討中である。

5. おわりに

格子移動機構によるしま走査モアレ装置を開発した。本装置は感度補正をすることにより、 $1.6\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ の白色塗装平面の面に垂直な方向の変形を約 0.3mm の精度で測定できる。また、宇宙用パネルの熱変形実験については、本装置を利用して所要の精度と測定時間で熱変形の測定が実現できた。

近年、大型構造の変形測定の要求が増えている。本研究で開発した計測法はSARアンテナの特性評価に目標を絞ったものではあるが、大型形状を高精度で測定できる特長をもつため、他の用途にも適用できる。しかし、用途を限定しない測定装置として広く応用するためには、感度補正と原点補正が必要である点、対象に白色塗装が必要である点、などが課題である。

しま次数とレンズひずみを考慮した補正を加えることによって、将来は、測定による補正なしに光学系の設定条件から絶対形状の測定を行う方法を開発したい。

参考文献

- 1) 吉澤 徹, 鈴木賢策: 格子パターン投影による三次元形状の自動測定, 精密機械, 53,3 (1987)422.
- 2) 格内 敏ほか: しま走査干渉じま投影法による3次元形状計測, 精密機械, 55,1(1989)141.
- 3) 武田光夫: サブフリンジ干渉計測基礎論, 光学, 13,1(1984)55.
- 4) 谷田貝豊彦: 光干渉計測法の最近の進歩, 精密機械, 51,4(1985)695.
- 5) 森本吉春: 走査モアレ法と画像処理によるひずみ計測, 非破壊検査, 35,2(1986)62.
- 6) 新井泰彦, 阿波啓造: 走査モアレ法のしま次数自動決定法, 精密機械, 52,5(1986)900.
- 7) 吉澤 徹ほか: 位相検出によるモアレ法の高感度化, 精密機械, 51,4(1985)816.
- 8) 吉澤 徹, 米村元喜: 格子移動機構を備えた投影型モアレトポグラフィ法, 精密機械, 43,5(1977)556.