

光位相を用いた三次元形状計測

森本吉春

形状や変形を計測する方法はすでに多くの方法が開発されているが、高速・高精度計測できるものは少ない。ここでは各種光学的方法により得られた投影格子や縞画像の位相を利用した方法を紹介します。とくに、3~4枚の画像から矩形波格子や余弦波格子の位相分布が連続的に計測できる積分型位相シフト法、位相シフトした多数の画像の各点の輝度のフーリエ変換により高精度に位相を解析できるフーリエ変換位相シフト法、複数の基準板を用いた高精度形状計測法、位相シフトデジタルホログラフィ干渉法を用いた変位計測法は実時間で計測できたり、計算時間が少しかかっても高精度に解析することができる。これらの計測の原理とその適用例を示す。

Shape Measurement by Optical Phase Analysis

MORIMOTO, Yoshiharu

Accurate shape measurement methods using optical phase analysis proposed by authors are introduced. Especially, the theory and applications of the integrated phase-shifting method, the phase-shifting method using Fourier transform, the accurate shape measurement method using reference plate, and the digital holographic interferometry using windowed hologram are explained.

1. はじめに

格子法、モアレ法、モアレトポグラフィ、トワイマン・グリーン干渉法、ホログラフィ干渉法などの光学的全視野計測法は非接触方式であり、高速に形状や変位の計測ができる[1-4]。ここでは、光学的方法により得られた縞画像を高精度に解析するための縞画像解析法を紹介する[5-10]。著者らは、以下の方法を解析してきた。移動する格子を投影しながらテレビカメラで撮影するだけで形状が計測できる特徴量抽出法[11]、テレビカメラで撮影するだけで等変位線や等高線を表示する走査モアレ法[12]、滑らかな美しいモアレ縞を表示する位相シフト走査モアレ法[13]、変形が計測できる位相差走査モアレ法[13]、多くの位相シフトした格子の画像と矩形波との相関を求めて位相を解析する相関位相シフト法[14]、3~4枚の画像から矩形波格子や余弦波格子の位相分布が連続的に計測できる積分型位相シフト法[15,16]、不等間隔である格子を用いた周波数変調格子投影による位相接続法[17]などの形状計測法、位相シフトした多数の画像の各点の輝度のフーリエ変換により高精度に位相を解析できるフーリエ変換位相シフト法[6,18]、複数の基準板を用いた高精度形状計測法[19]、DMDカメラを用いた高速変形解析法[20,21]、回折格子を用いたモアレ干渉法による2次元変位解析法[22]、位相シフトデジタルホログラフィを用いた変位計測法[23]。これらの方

法は実時間で計測できたり、計算時間が少しかかっても高精度に解析することができる。ここでは、まず、格子や縞画像の位相を解析する方法の基本的考え方を述べ、上記方法のいくつかを紹介し、具体的計測への適用例を示す。

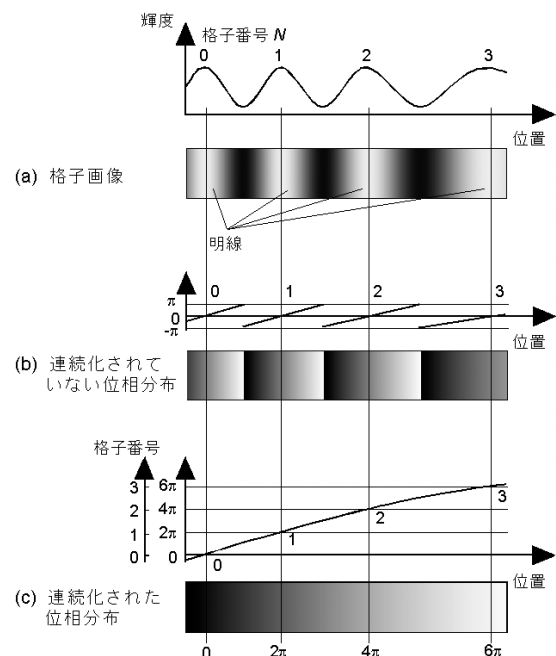
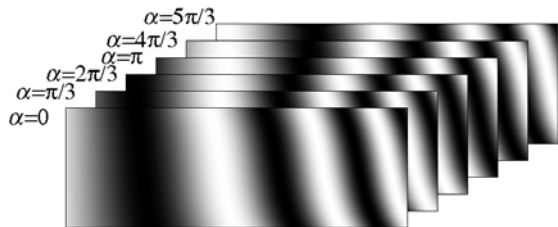


図1 格子や干渉縞の輝度と位相分布

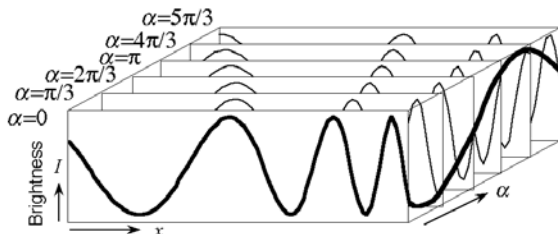
2. 縞画像の位相解析

初期の縞画像処理では、格子や縞画像を二値化・細線化・断線接続などの処理をおこなった後、縞中心の座標を求めていた[24]。この方法だと縞次数の増減判定が困難である。また、縞の中心位置の以外ではデータが得られず、ほとんどの場所のデータは直接には役に立たない。さらに、縞の中心位置で得られる座標値も1画素単位であり、精度が悪く、画面の全点の分布を得るには、なんらかの補間作業を必要とするなどの欠点があった。

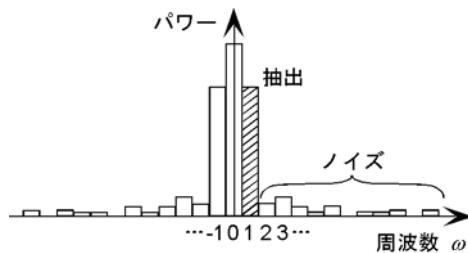
最近、格子や縞の輝度分布を余弦波形とみなし、その波の位相をすべての点の輝度情報から求める方法がいくつか提案された[6,7,25-31]。この波の位相を求めると、縞画像すべての点で小数次の縞次数を精度良く求めたことに相当し、同じ解析手順ですべての点の解析ができる。これ



(a) 位相シフトにより得られた画像



(b) x方向の線上の輝度分布および一点の輝度変化



(c) 一点のフーリエスペクトルの模式図



(d) 初期位相分布

図2 位相シフトにより得られた画像とフーリエ変換位相シフト法による位相解析の説明図

により、高速・高精度な解析の自動化が行われるようになってきた。まず、この位相解析について説明する。

図1に示した格子や干渉縞の輝度値 $I(x, y)$ は一般に空間 (x, y) 上に余弦波状に分布している。

$$I(x, y) = a(x, y) \cos \phi(x, y) + b(x, y) \quad (1)$$

ここで、点 (x, y) は撮影された画像内の一点で、 $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ はそれぞれ各点における輝度振幅、背景輝度を表わし、 $\phi(x, y)$ は格子の位相値を表わす。波形は波の1周期を $2\pi (=360^\circ)$ とする位相をもつ。縞画像の場合、縞次数(格子画像の場合は格子の線番号)を N とすると、

$$\phi = 2\pi N \quad (2)$$

となる。この N が整数となる位置を求める方法が縞中心解析法である。式(1)のフーリエ変換、ウェーブレット変換、ガボール変換などを行うことにより、各点の位相を求めることができる[7]。

次に、投影格子や干渉縞の位相を α だけシフトさせた場合、格子の輝度分布 $I(x, y)$ は、次式のように表わすことができる。

$$I(x, y) = a(x, y) \cos \{ \phi(x, y) + \alpha \} + b(x, y) \quad (3)$$

この α を0から 2π までわずかにシフトさせながら連続的に画像を撮影し、それらの画像を奥行き方向に重ねることで、図2(a)に示す例のように、三次元画像データ $I(x, y, \alpha)$ が得られる。

このようにして得られた三次元画像のある1点 (x, y) に注目すると、図2(b)に示すように輝度が投影格子と同じ輝度変化を持ちながらちょうど α 方向に1周期分変化し、 $\alpha = 0$ のときの位相すなわち初期位相は投影格子の位相 ϕ と一致する。

この初期位相 ϕ を解析する方法として、位相シフト法[27]、積分型位相シフト法[15,16]、フーリエ変換位相シフト法[18]などがある。

以下、これらの解析を行うための個々の計測法の原理と適用例を示す。その前に、位相と形状の関係をもアレトポグラフィの場合について説明する。

3. モアレトポグラフィによる形状計測原理[8,16]

形状計測に光切断法がよく用いられるが、1枚の画像で1本の線しか解析できず、スリット光の位置が画素単位でしか求められないため、解析に時間がかかり精度も悪い。それに比べ、全視野を一度に解析する格子投影法は、試料全面を同時に解析するため高速解析ができ、格子の輝度変化を波として、その位相解析を行えばその精度も良い。

格子投影法の一つに、モアレトポグラフィを用いた方法

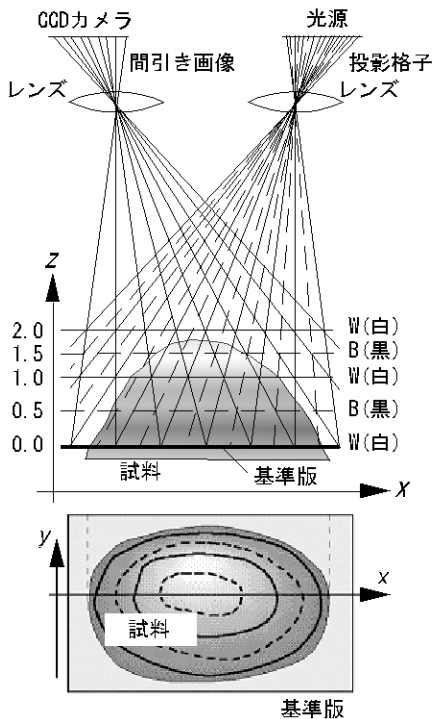


図3 格子投影法（モアレトポグラフィ）による形状計測原理

がある。モアレトポグラフィによる形状計測原理を図3に示す。プロジェクタとカメラは、それぞれのレンズの光軸がz方向を向き、さらにレンズがz方向に同じ高さになるように設置する。こうすると、等高線を示す縞が得られる。図3では、プロジェクタから投影される格子の白の部分が実線で、黒の部分が破線で描かれている。また、基準面に投影された格子の白の部分に対応するカメラの各画素からの視線がカメラレンズ中心を通る実線で示されている。プロジェクタからの実線および破線とカメラからの実線が交わる点は図中それぞれ実線Wおよび破線Bに示すように水平線上に分布する。この場合、基準面上はWとなる。

基準面の上部に試料物体を置いた場合、物体表面に投影された格子は物体のz方向の高さに応じて変形した格子画像としてカメラに撮影される。カメラ側の実線部の映像だけを見ると試料物体の実線Wおよび破線Bの高さの部分に黒と白の線がモアレ縞の等高線として現われることになる。ここでは基準格子の代わりにカメラの各画素がおこなっていることになる。この等高線の位相分布を得ることができれば、その位相値は試料物体の基準面からの高さに対応している。ある画素に注目すると、その画素に写っている等高線の位相値は、その画素における試料物体に投影された格子の位相値と基準面に投影された格子の位相

値との差として得ることができる。位相の差を計算すると、装置の誤差がキャンセルされることにより、精度の良い結果が得られる。

すなわち、試料物体に投影された位相分布と基準面に投影された格子の位相分布との差を各点で求めることによって、試料物体の高さ分布を得ることができる。

4. 位相シフト法による縞の位相解析[25]

式(3)において、 α を $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ と変えた場合の輝度分布をそれぞれ I_1 , I_2 , I_3 とすると初期位相 ϕ は、

$$\tan \phi = \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \quad (4)$$

で表わされる。

あるいは α を 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ と変えた場合の輝度分布をそれぞれ I_0' , I_1' , I_2' , I_3' とすると初期位相 ϕ は

$$\tan \phi = -\frac{I_3' - I_1'}{I_2' - I_0'} \quad (5)$$

で与えられる。

位相シフト法を用いれば、位相値は試料物体の反射率や背景輝度に関係なく求めることができる。また、各画素ごとに位相を求めることができるため、段差のような不連続部分がある試料に対しても位相を精度良く求めることができる。

5. 積分型位相シフト法による矩形波格子の位相解析[16]

5.1 積分型位相シフト法による矩形波格子の解析原理

テレビカメラは、CCDの各画素に30分の1秒間にためられた光量を輝度として出力している。すなわち30分の1秒間の積分値を出力している。これを利用して高速に位相解析ができる。

矩形波状の輝度分布をもつ格子を物体に投影し、等速で格子を位相シフトさせながら、1ピッチのシフトに対して画像4枚撮影となる速度で格子画像を撮影すると、CCD

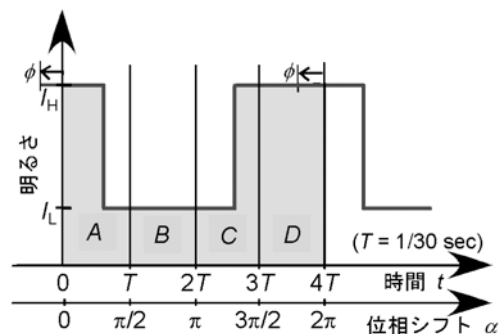


図4 積分型位相シフト法の説明図

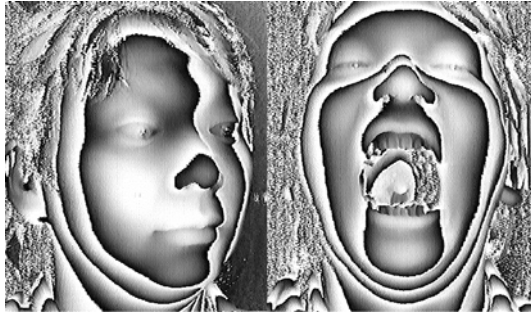


図5 実時間積分型位相シフト法による形状計測の例

カメラの各画素の出力は格子の輝度の変化をそれぞれ撮影時間分だけ積分したものとなり、画像1枚目から4枚目までで得られる出力は、図3(a)における面積A~Dの値となる。この面積は、

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^T I(t, \phi) dt = T \left\{ I_L + \frac{\pi/2 - \phi}{\pi/2} (I_1 - I_0) \right\} \\
 B &= \int_T^{2T} I(t, \phi) dt = T I_L \\
 C &= \int_{2T}^{3T} I(t, \phi) dt = T \left\{ I_L + \frac{\phi}{\pi/2} (I_1 - I_0) \right\} \\
 D &= \int_{3T}^{4T} I(t, \phi) dt = T I_H
 \end{aligned} \tag{6}$$

となる。 $X = A - C$ 、 $Y = D - B$ と定義すると、初期位相 ϕ は θ の関数として次のように求めることができる。

$$\phi = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{X}{Y} \right) \tag{7}$$

$X = A - C$ 、 $Y = D - B$ の計算は簡単なので実時間で可能である。式(7)の計算は少し複雑で計算に時間がかかり実時間では困難であるが、位相を X と Y の関数として得られるルックアップテーブルをあらかじめ作成しておき、 X と Y の値が決まれば、ルックアップテーブルを参照することにより、簡単に高速に位相を求めることができる。このアルゴリズムをデジタルプロセッサを用いてハードウェア化することにより実時間処理ができる。

5.2 モアレトポグラフィによる実時間形状計測[8, 16]

積分型位相シフト法を用いて実時間で(30分の1秒ご

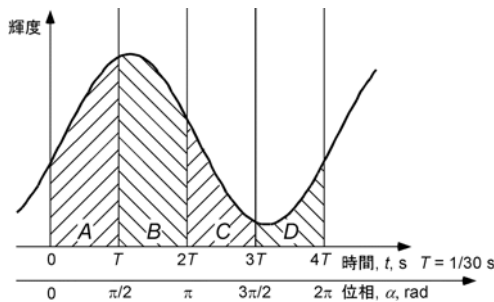


図6 位相シフト時のCCDにおける輝度変化

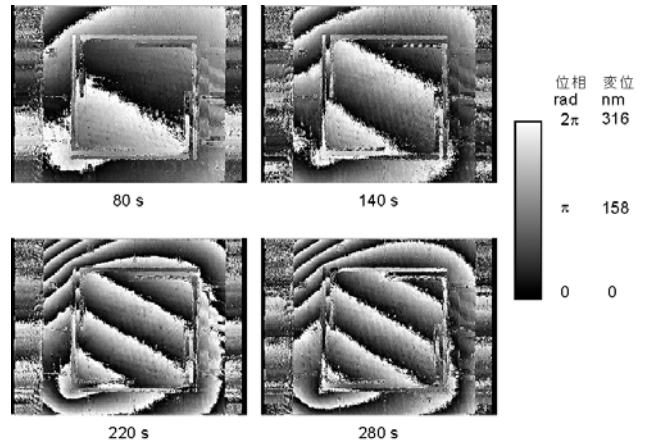


図7 加速度計の面外変位計測実験

とに)人体の形状計測をした例を図5に示す。人が静止していなくても形状の計測がおこなえている。物体の反射率に拘らず全範囲で正確に距離情報が得られている。

この方法は、格子が投影でき、カメラで撮影できるなら、大きなものでも小さなものでも、高速現象でも、同じように計測でき、適用範囲が広い。

5.3 積分型位相シフト法による余弦波縞の解析原理

余弦波状の輝度分布をもつ干渉縞の場合も同様に、干渉縞を位相シフトさせながら、1ピッチのシフトに対して画像4枚撮影となる速度で格子画像を撮影したときの輝度をA~Dとすると、初期位相 ϕ はやはり、次のように求めることができる。

$$\tan\left(\phi + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{Y}{X} \tag{8}$$

矩形波縞の場合と同様に、位相は $X = A - C$ 、 $Y = D - B$ の関数となっており、ルックアップテーブルだけを式(8)のように変えておけば、矩形波の場合と同じ装置が使える。

5.4 レーザ干渉法によるナノメータ変形計測[8, 16]

積分型位相シフト法をトワイマン・グリーン干渉計に適用することにより、マイクロマシン技術を用いて製作された加速度センサの熱変形計測をおこなった結果を図7に示す。一輝度段階は約1ナノメータの高さを表わしており、高分解能な解析が可能となっている。

6. フーリエ変換位相シフト法

式(3)をフーリエ級数で表すと、

$$I(\alpha) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(jn\omega_0\alpha) \tag{9}$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(\alpha) \exp(-jn\alpha) d\alpha \tag{10}$$

となる。ここで、 ω_0 は基本周波数、 T は関数 $I(\alpha)$ の周期である。なお、簡単にするために (x, y) を省略している。ノイズがない場合は $n = -1, 0, 1$ だけとなるが、一般にはノイズがあるため、他の項が存在する。式(9) をフーリエ変換すると次式に示すスペクトルが得られる。

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\pi c_n \delta(\omega - n\omega_0) \quad (11)$$

ここで、 δ はデルタ関数、 ω は周波数である。図 2 (c) に示すように周波数 1 の成分は位相シフトにより得られた輝度変化の 1 次成分を表し、ノイズなどのような位相値を求めるのに不要な成分は、ほとんどが $-1, 0, 1$ 以外の周波数として得られる。したがって、次のように周波数 1 のスペクトルのみを抽出し、虚部と実部の比の逆正接を計算すると、きわめて精度よくその画素における位相値を求めることができる。すなわち、式(11) から周波数 1 の成分だけ抽出すると、 $T = 2\pi$ 、 $\omega_0 = 1$ であるから、

$$\begin{aligned} F(1) &= 2\pi c_1 \delta(0) \\ &= \delta(0) \int_{-\pi}^{\pi} I(\alpha) \exp(-j\alpha) d\alpha \\ &= \pi a \exp(j\phi) \delta(0) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。したがって、初期位相 ϕ は、 $F(1)$ の実部と虚部の値から次式のように求めることができる。

$$\tan \phi = \frac{\text{Im}\{F(1)\}}{\text{Re}\{F(1)\}} \quad (13)$$

以上の計算を全画素について行うことによって、位相分布を得ることができる。図 2 (a) に示す位相シフト三次元画像に対してこの操作を行った結果得られた位相分布を図 2 (d) に示す。

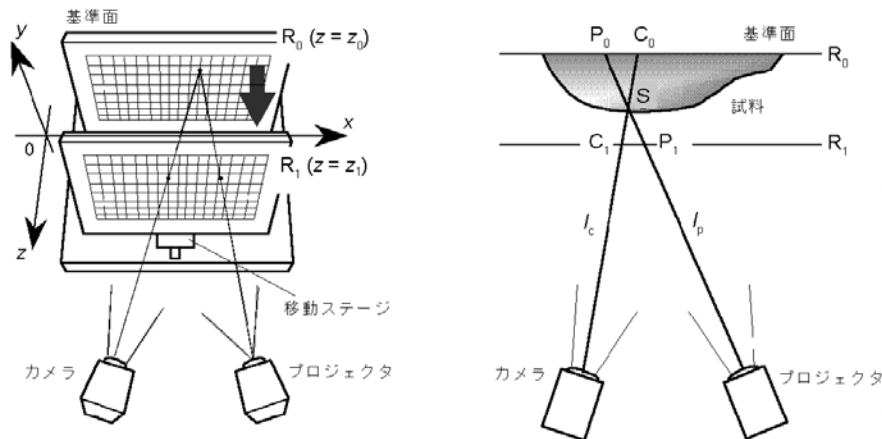


図8 基準面を用いた三次元形状計測の原理

7. 基準面を用いた高精度形状計測[19]

7.1 基準面を用いた高精度形状計測計測原理

多くの計測法は光学系パラメーターとしてカメラとプロジェクタのレンズの中心位置と光軸の向きなどを用いている。しかし、レンズに収差がある場合は、レンズの中心位置が一点とはいえなくなり、誤差が大きくなる。高精度解析法ではこの影響が無視できなくなる。

そこで、試料近傍に設置した正確な寸法のわかっている基準平面から得られる情報だけを座標計算に用いる新しい方法を開発した。この方法はフーリエ変換位相シフト法と組み合わせることによって非常に高精度な方法となっている。フーリエ変換位相シフト法では、位相シフトされた波形は、周波数 1 となる成分を抽出することによりノイズのないもっとも自然な余弦波に置き換えられ、もっとも高精度な位相解析法である。

物体表面上のある点の空間座標は、そこに投影されている光の通る経路と、その点からの光がカメラの画素に到達するまでの経路の交点として求めることができる。そのためには、プロジェクタの各画素と投影される各光線が通る経路の関係、およびカメラの画素とその画素に到達する光の経路の関係をあらかじめ求めておく必要がある。図 9 に 2 枚の基準面を用いる手法の原理を示す。図 8 (a) に示すようにカメラで基準面に描かれたピッチが既知で等間隔の 2 次元格子を撮影し、位相解析をおこなうことで、カメラの撮像面の全ての画素ごとに撮影している基準面上での空間座標を求める。基準面を 2 ヶ所に設置することで、空間上の 2 点を得られるため、全ての画素ごとにその画素に到達する光の経路を求めることができる。また、プロジェクタから基準面に投影された 2 次元格子をカメラで撮影し、その位相値を解析することで、プロジェクタで投影する

2 次元格子の位相値とその位相値を持つ光線が通る基準面上での空間座標の関係を精度良く求めることができる。

物体の計測時には、図 8 (b) に示すように 2 直線の交点として物体上の点の空間座標を求める。この手法を拡張し、基準面の数を増加させ、最適に選択された 2 枚の基準面を用いて座標計算をおこなうことによって、さらに高精度 (100 mm 角程度の大きさの物体で精度 10 μm 以下) に形

状計測を行うことができることを実験により確認している。

7.2 基準面を用いた高精度形状計測例

本形状計測手法の適用例として、図9に流体用ポンプのスクリーンの形状計測例を示す。表面の乱反射成分を増やすために表面には薄く白色のラッカーが塗布されている。図9(a)は正

面から計測した結果である。図9(b)に図9(a)におけるA-A'断面の形状を示す。また、図9(c)は側面から計測した結果である。図9(d)に図9(c)におけるC-C'断面の形状を示す。このように計測装置の入れにくい部分でも、側面から見ることで計測が可能となる。

8. 位相シフトデジタルホログラフィによる微小変位計測 [23, 28]

ホログラフィ干渉法は粗面物体の変位・変形・形状などを非接触・高感度・全視野で計測できる[29,30]。しかし、高分解能なホログラフィ乾板が入手しにくくなったこと、現像が煩わしいこと、解析に時間がかかるなど、いくつかの問題点がある。

近年、コンピュータの計算処理能力の向上と CCD 素子の高解像度・高画素化により、ホログラムをフィルムではなく CCD カメラに記録し、コンピュータにより再生するデジタルホログラフィが開発されている。CCD の画素間隔は粗いが、物体光と参照光をほぼ同じ方向から当てる on-axis 型により縞間隔を粗くできる。デジタルホログラフィは現像処理が不要なので高速に再生できる。

デジタルホログラフィでは0次と±1次回折像が重なり合いながら再生され、それぞれの回折像を取り出すことは困難である。しかし、山口らによる位相シフトデジタルホログラフィの開発により、この制約が解決された[31-33]。

ホログラフィは物体を記録するのにカメラレンズがない。光情報は記録されているので、任意の距離の光を再現できる。レンズを使うと、焦点を何点かに合わせなければ

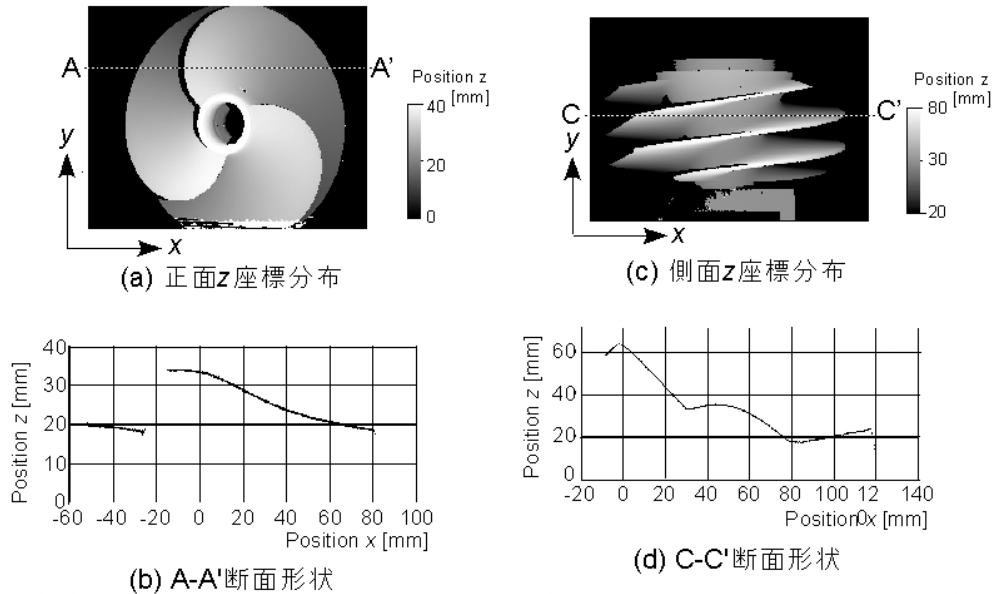


図9 基準面を用いた三次元形状計測法によるスクリーンの形状計測

なければならないような奥行きのある物体では、焦点が合わない点では、大きな計測誤差が生じる。位相シフトデジタルホログラフィは、位相シフトされた複数枚のデジタルホログラムから CCD 面の物体光の複素振幅を求め、フレネル変換により再生をおこなう手法である。光情報は記録されているので、フレネル変換により、任意の距離で焦点の合った再生像を得ることができる。そのために、それぞれの奥行きごとに焦点の合った再生像と変位量を得ることができ、奥行きのある物体の計測に有効である。

そこで、我々はホログラムはその一部分にも物体の全視野の情報をもっていることを利用して、ホログラムを分割して再生して得られた位相の中で、各点で振幅が大きい分割ホログラムの位相を採用して、信頼度の高い位相のみを利用することにより、精度のよい解析ができる新しい方法を開発した。その有効性を示す。

8.1 位相シフトデジタルホログラフィ干渉法の原理

図10に位相シフトデジタルホログラフィの光学系を示す。コンピュータに入力される干渉縞の強度を $I(x, y, \alpha)$ とすると、CCD 面における物体光のみの振幅 $a_o(x, y)$ と位相 $\phi_o(x, y)$ を以下のように求めることができる。

$$a_o(x, y) = \frac{1}{4} \sqrt{\left\{ I(x, y, \frac{3\pi}{2}) - I(x, y, \frac{\pi}{2}) \right\}^2 + \left\{ I(x, y, 0) - I(x, y, \pi) \right\}^2} \quad (14)$$

$$\tan \phi_o(x, y) = \frac{I(x, y, \frac{3\pi}{2}) - I(x, y, \frac{\pi}{2})}{I(x, y, 0) - I(x, y, \pi)} \quad (15)$$

ここで、 α は PZT ステージに取り付けたミラーによりシフ

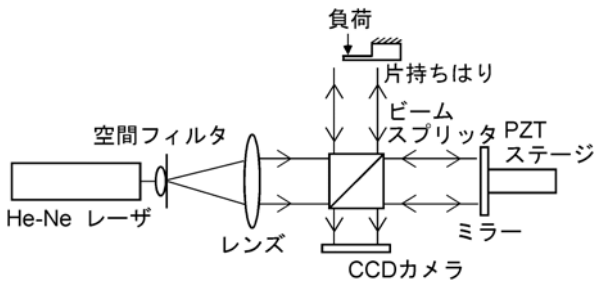


図10 位相シフトデジタルホログラフィの光学系

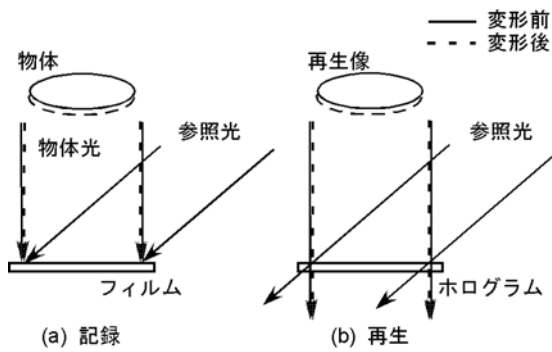


図11 ホログラフィ干渉法

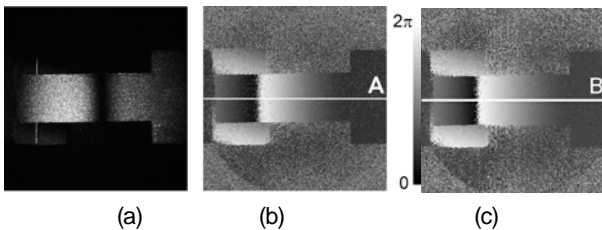


図12 片もちはりの解析結果: (a) 再生した縞画像, (b) 全画素から解析された位相分布, (c) 16分割されたホログラムから解析された位相分布

トさせる参照光の位相量で, $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ である. これらの位相と振幅より CCD 面での複素振幅分布 $g(x, y)$ を求めると次式のようになる.

$$g(x, y) = a_o(x, y) \exp\{i\phi_o(x, y)\} \quad (16)$$

CCD 面における物体光のみの複素振幅分布を物体の置いていた地点である再生面までフレネル変換することで元の物体の複素振幅分布を求めることができる. このフレネル変換の式を以下に表わす.

$$u(X, Y) = \exp\left[\frac{ik(X^2 + Y^2)}{2R}\right] F\left\{\exp\left[\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R}\right] g(x, y)\right\} \quad (17)$$

ここで, $u(X, Y)$ は再生面での複素振幅分布, R は CCD 面と再生面の距離, k は波数, F はフーリエ変換を表わす演算子である. この再生面の複素振幅分布の強度を求めるこ

とで再生像を得ることができる.

ホログラフィ干渉法概念図を図11に示す. 変形によっておこる位相変化 $\Delta\phi(x, y)$ と面外変位 $w(x, y)$ との関係は以下のように表わすことができる.

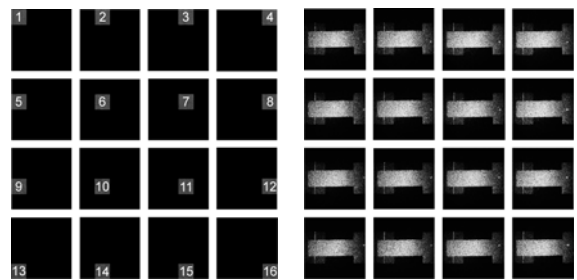
$$w(X, Y) = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi(X, Y) \quad (18)$$

ここで λ は光源の波長である.

8.2 片もちはりの変位計測実験

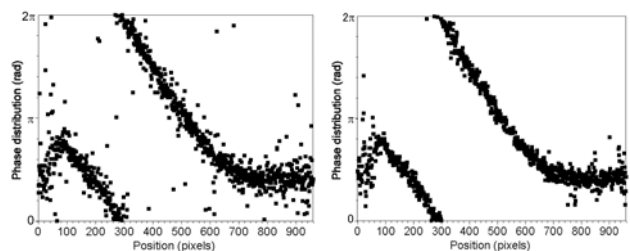
図11の光学系を用いて取り込んだ画像の, 中央部分の 960×960 画素を13.1節の方法により解析した. 片もちはりの変形前後における物体光での干渉縞と位相差画像を図12(a), (b)に示す.

つぎに, 図13(a)に示すように, 変形前後のホログラムを 240×240 画素に分割し, それぞれの分割した画像から, フレネル変換の式より再生画像として, 図13(b)に示すように物体光のみの複素振幅画像を得た. 再生された物体光の各点において, 16個の複素振幅が得られる. 変形前後の対応する振幅の平均振幅を調べ, それが最大のときの変形前後の位相の差を採用する. このようにして16個の位相差の中でもっとも強度が大きい信用度の高い位相のみを採用することにより, 図12(c)に示す位相差画像を得た. また, 図12(b), (c)における480ライン目であるラインA, Bにおける位相値をそれぞれ図14(a), (b)に示す. 理論値との誤差の標準偏差はそれぞれ23.5nm, 8.3nmであった. ホログラムを分割したことにより誤差が35%



(a) 分割されたホログラム (b) 再生像

図13 分割されたホログラムと再生像



(a) 全画素から得られた位相差分布 (b) 16分割されたホログラムから得られた位相差分布

図14 中央の水平線に沿った位相分布

に減少した。各分割ホログラムから得られた位相差を平均化などを行うことにより、さらに高精度な結果が得られている¹⁴⁾。

ホログラフィはスペックルの影響を受け、場所によって光の強度が大きく異なる。パワーの強い部分のデータは信用性が高いのでその部分の重みを大きくして、分割して得られた画像による結果の平均をすると、精度が良くなる。

14. おわりに

著者らの開発した格子や干渉縞の位相を解析する方法のいくつかを紹介した。これらの方法により、形状や変形などの分布を実時間で(30分の1秒ごとに)あるいは高精度に求めることができた。また、レーザー干渉に適用した場合はナノメートルの分解能で変位分布を計測することができた。これらの方法、とくに、位相シフトデジタルホログラフィ干渉法は実物の解析に有用であり、今後急速に普及すると思われる。機械工業・自動車工業・音響機器工業などの非破壊検査や医学など様々な分野で利用されることを期待している。

参考文献

1. Dally, J. W and Riley, W. F., *Experimental Stress Analysis*, 3rd Ed., McGraw-hill, New York (1991).
2. Kobayashi, A. S., *Handbook on Experimental Mechanics*, 2nd Ed., VCH Publishers, New York (1993).
3. 高橋賞, フォトメカニクス, 山海堂 (1997).
4. Rastogi, P. K., *Photomechanics*, Springer-Verlag, Berlin (1999).
5. Morimoto, Y., Chap. 21 *Digital Image Processing*, Kobayashi, A. S., *Handbook on Experimental Mechanics*, 2nd Ed., VCH Publishers, New York, 969-1029 (1993).
6. 森本吉春, フーリエ変換を用いた応力・ひずみ分布測定, 非破壊検査, Vol. 44, No. 7, 505-514 (1995).
7. 森本吉春, 藤垣元治, 各種変換を用いた応力・ひずみ測定技術, 非破壊検査, Vol. 46, No. 7, 473-480 (1997).
8. 森本吉春, 藤垣元治, 米山聡, 高速・高精度応力・変形・形状測定, 非破壊検査, Vol. 50, No. 6, 356-362 (2001).
9. 森本吉春, 藤垣元治, 米山聡, モアレ法・格子法による形状・変形計測の最近の研究, 非破壊検査, Vol. 52, No. 3 (2003) (掲載可).
10. Morimoto, M. and Fujigaki, M., *Real-time Phase Analysis Methods for Analyzing Shape, Strain and Stress*, *Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures: Second Volume*, ASTM, STP1323, 153-168 (2001).
11. Morimoto, Y. and Fujisawa, M., *Fringe-Pattern Analysis By Phase-shifting Method Using Extraction of Characteristic*, *Experimental techniques*, Vol. 20, No. 4, 25-29 (1996).
12. 森本吉春, 林卓夫, 山口典之, 走査モアレ法によるひずみ計測, 機論, 50, 451-A, (1984), 489
13. 藤垣元治, 森本吉春, 金汪根, 位相シフト走査モアレ法による実時間等高線・等変位線表示装置の開発, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 8, 1221-1225 (2000).
14. Fujigaki, M. and Morimoto, Y., *Accuracy of Real-Time Shape Measurement by Phase-Shifting Grid Method Using Correlation*, *JSME International Journal, Series A*, Vol. 43, No. 4, 314-320 (2000).
15. 藤垣元治, 森本吉春, 矢部正人, 積分型位相シフト法を用いた実時間ナノメートル変位分布計測, 日本機械学会論文集A, Vol. 67, No. 655, 39-42 (2001).
16. Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Toda, H., *Real-time Shape Measurement by Integrated Phase-Shifting Method*, *Proc. of SPIE (Interferometry '99, Techniques and Technologies)*, Vol. 3744, 118-125 (1999).
17. Ikeda, Y., Yoneyama, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., *Absolute Phase Analysis Method for 3D Surface Profilometry Using Frequency Modulated Grating*, *Optical Engineering*, 1249-1256 (2003).
18. Morimoto, Y. and Fujisawa, M., *Fringe Pattern analysis by a phase-shifting method using Fourier transform*, *Optical Engineering*, Vol. 33, No. 11, 3709-3714 (1994).
19. Fujigaki, M. and Morimoto, Y., *Shape Measurement by Grid Projection Method without Influence of Aberration of Lenses*, *Post Conference Proc. of the VIII International Congress on Experimental Mechanics, SEM*, 167-172 (1996).
20. 藤垣元治, 森本吉春, 高騫, デジタルマイクロミラーデバイスを用いた位相シフト走査モアレ法による形状計測, 実験力学, Vol. 2, No. 1, 50-54 (2002).
21. 高騫, 藤垣元治, 森本吉春, デジタルマイクロミラーデバイスを用いた投影格子の位相解析手法, 実験力学, Vol. 3, No. 2, 103-108 (2003).
22. 山本裕子, 森本吉春, 藤垣元治, 米山聡, 隆雅久, 2成分同時積分型位相シフト法によるモアレ干渉縞解析, 実験力学, Vol. 2, No. 1, 44-49 (2002).
23. 高橋功, 森本吉春, 野村孝徳, 米山聡, 藤垣元治, 位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測, 実験力学, Vol. 3, No. 2, 98-102 (2003).
24. 森本吉春, 瀬口靖幸, 稲谷多圭士, 格子法によるひずみ解析の画像処理による自動化, 非破壊検査, Vol. 36, No. 8, 546-551 (1987).
25. Creath, K.: *Phase measurement interferometry techniques*, *Prog. Opt.*, 26, 350 (1988).
26. Morimoto, Y., Fujigaki, M., and Iwai, K., *Shape Measurement of Moving Human Body*, *Proceedings of International Conference on Machine Automation (ICMA2000)*, 345-350(2000).
27. Kakunai, S., Iwata, K., and Sakamoto, T., *Profile Measurement by Projecting Two Gratings with Different Pitches*, *Opt. Rev.*, 1-2, 296-298 (1994).
28. Y. Morimoto, T. Nomura, M. Fujigaki and I. Takahashi: *Reduction of Speckle Noise Effect by Divided Holograms in Phase-Shifting Digital Holography*, *Proceedings of the 12th ICEM*, pp. 554-555, (2004)
29. 村田和美著: *ホログラフィー入門*, 朝倉書店, (1976), 62-67.
30. 辻内順平著: *ホログラフィー*, 裳華房, (1997), 211-229.
31. Yamaguchi, I. and Zhang, T.: *Phase-shifting Digital Holography*, *Opt. Lett.*, 22-16, 1268-1270 (1997).
32. 山口一郎: *デジタルホログラフィーとその発展*, 光技術コンタクト, 37 (1999), 688-695.
33. I. Yamaguchi, J. Kato and H. Matsuzaki: *Measurement of Surface Shape and deformation by Phase-shifting Image Digital Holography*, *Opt. Eng.* 42(5), pp. 1267-1271, (2003).