

光干渉縞や投影格子の波形の位相を用いた三次元形状・変形計測

森本吉春[†] 松井 徹[†] 藤垣元治[†]

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・高精度で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する。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したり、計算時間が少しかかっても高精度に解析したりすることができる。ここでは著者らが主として開発した計測方法の原理とその適用例を示す。

Shape and Deformation Measurement by Phase Analysis of Interference Fringes or Projected Gratings

YOSHIHARU MORIMOTO,[†] TORU MATUI[†] and MOTOHARU FUJIGAKI[†]

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 a reference plate, and the digital holographic interferometry using windowed holograms are explained.

1. はじめに

安全で安心な社会の実現のために、建物や橋梁や機械などの構造物の強度などの健全性の評価は重要である。これらの強度評価は、主としてひずみゲージを用いた接触式1点計測法により行われてきた。しかし、構造物の強度を確認するためには分布計測が重要である。分布計測法としては、非接触で、高速に形状や変形の計測ができる格子法、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が有用である^{1)~4)}。これらの方法は古くから提案されており、定性的解析によく用いられている。しかし、そのデータ量が多いため定量的解析が困難であったが、コンピュータを用いた画像解析が行われるようになってより有用となってきた。著者らも光学的全視野計測法と画像計測を用いたいくつかの方法を開発してきた^{5)~10)}。これらの成果の要点を示すと、まず、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簡単に形状が計測できる特徴量抽出法¹¹⁾を開発した。次に、テレビカメ

ラで撮影するだけで高速に等変位線や等高線を表示する走査モアレ法¹²⁾を提案した。さらに、格子の位相をシフトしながら投影することにより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⁾と、その原理を応用して変形が計測できる位相差走査モアレ法¹³⁾を提案した。次にそれを定量的に解析するために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⁾と、それをより高速化するため、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)}を開発した。これらの位相解析法は位相が 2π の範囲に制限されるためそのままでは計測範囲が狭い。そこでこのダイナミックレンジを広げるため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⁾を提案した。さらに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位相を正確に解析できる高精度フーリエ変換位相シフト法^{6),18)}を開発した。これらの方法により計測が高精度になるとレンズの収差が問題となってくる。そこで、レンズの収差などの影響を除くことが可能な複数の基準板を用いた高精度形状計測法¹⁹⁾を提案した。一方、位相を高速に解析するため、筆者らが開発した1画素ごとにシャッタ機能のあるDMDカメラを

[†] 和歌山大学

Wakayama University

用いた高速変形解析法^{20),21)}を提案した。一方、レーザ干渉法にこれらの方法を適用し、光の波長の数百分の1の高分解能を持つ計測法を開発した。すなわち、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⁾や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²³⁾である。

これらの方法は上述のように、実時間で計測したり、計算時間が少しかかっても高精度に解析したりすることができる。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。

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行った後、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見なし、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1点で、 $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ はそれぞれ各点における輝度振幅、背景輝度を表し、 $\phi(x, y)$ は格子の位相値を表す。波形は波の1周期を $2\pi (= 360^\circ)$ とする位相を持つ。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、ウエーブレット変換、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

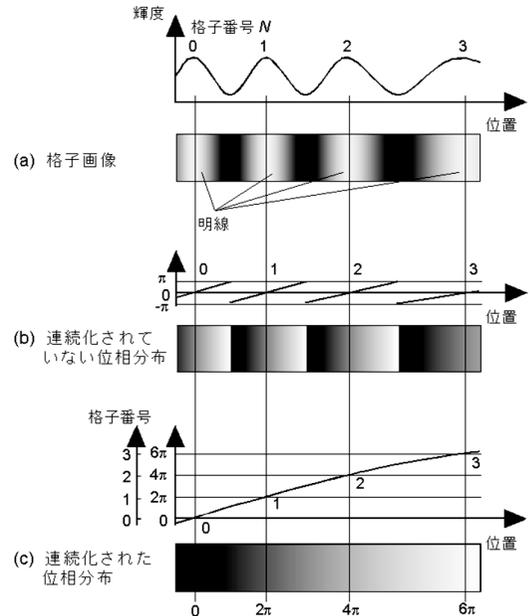


図1 格子や干渉縞の輝度と位相分布

Fig. 1 Distributions of brightness and phase of grating or fringe patterns.

表すことができる。

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

この α を 0 から 2π までわずかずつ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

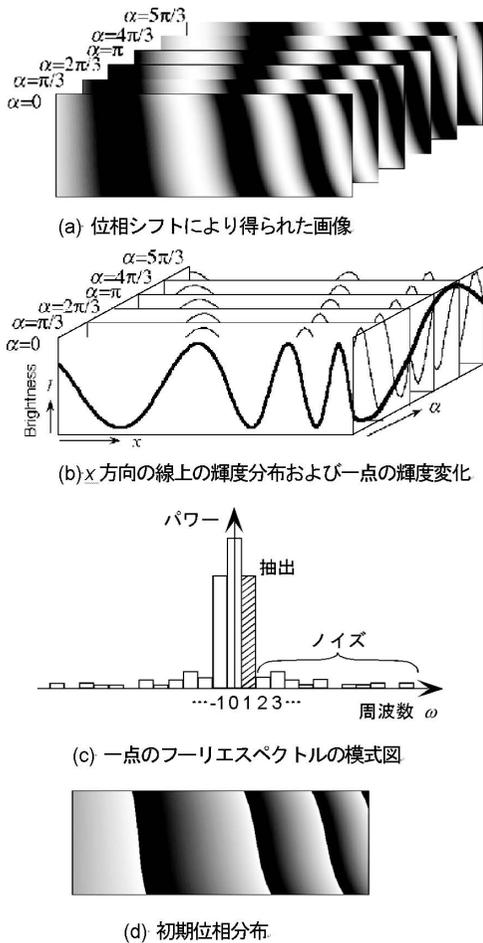


図 2 位相シフトにより得られた画像とフーリエ変換位相シフト法による位相解析
 Fig.2 Images obtained by phase-shifting method and phase analysis of phase-shifting method using Fourier transform.

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 1 つに、モアレトポグラフィを用いた方法がある。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

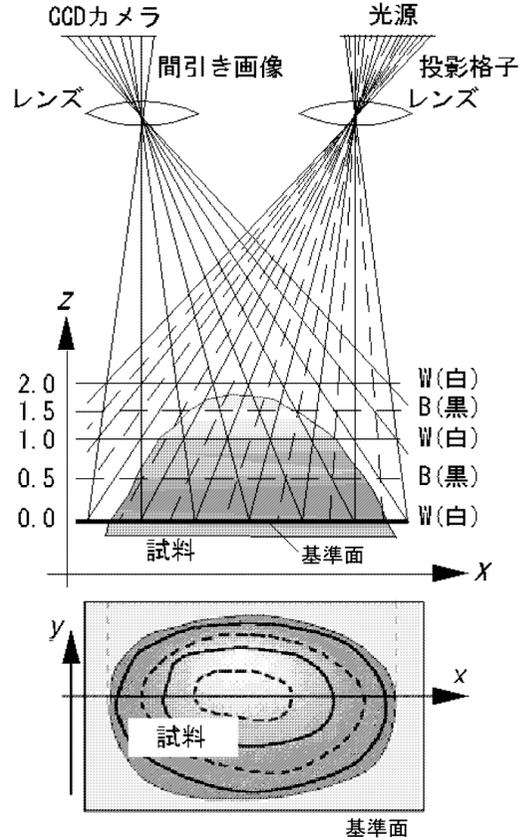


図 3 格子投影法 (モアレトポグラフィ) による形状計測
 Fig.3 Shape measurement by grating projection method (Moire topography).

水平線上に分布する。この場合、基準面上は実線 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行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、

$$\tan \phi = \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \tag{4}$$

で表される。

あるいは α を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 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

$$\tan \phi = -\frac{I'_3 - I'_1}{I'_2 - I'_0} \tag{5}$$

で与えられる。

位相シフト法を用いれば、初期位相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、各画素ごとに初期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初期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持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 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 4 における面積 $A \sim D$ の値となる。この面積は、

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

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

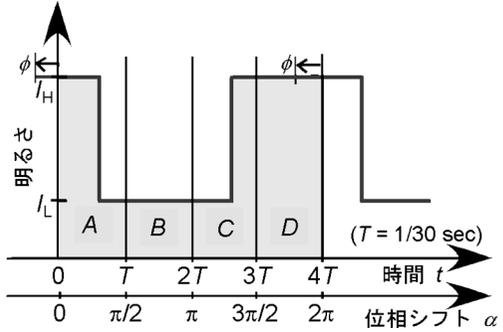


図 4 矩形波格子用積分型位相シフト法における輝度変化
Fig. 4 Brightness change in integrated phase-shifting method for rectangular grating pattern.

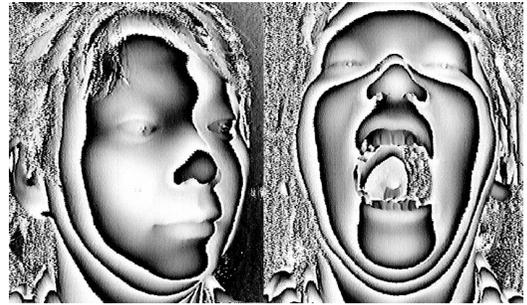


図 5 実時間積分型位相シフト法による形状計測
Fig. 5 Shape measurement by real-time integrated phase-shifting method.

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できています。物体の反射率にかかわ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、

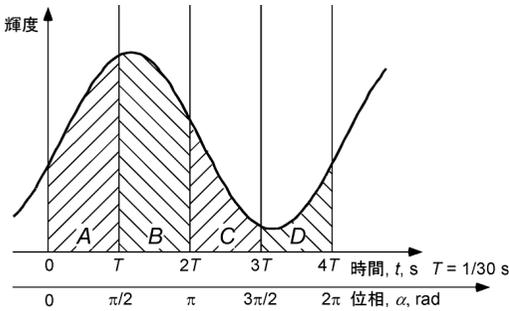


図 6 余弦波干渉縞用積分型位相シフト法における輝度変化
Fig. 6 Brightness change in integrated phase-shifting method for sinusoidal fringe pattern.

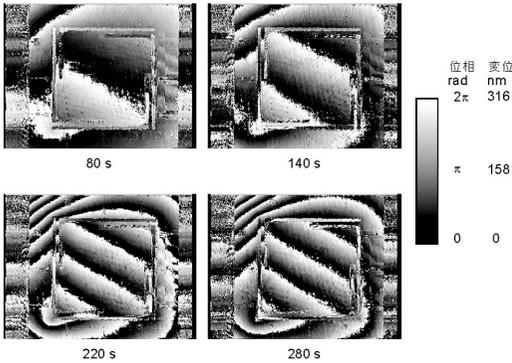


図 7 マイクロ加速度計の面外変位計測

Fig. 7 Out-of-plane displacement measurement of micro accelerometer.

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持つ干渉縞の場合も同様に、図 6 に示すよう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行った結果を図 7 に示す。1 輝度段階は約 1 ナノメータの高さを表しており、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、

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

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} I(\alpha) \exp(-jn\omega_0\alpha) d\alpha \tag{10}$$

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。

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

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 $\omega = 1$ 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 $\omega = 1$ 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、きわめて精度良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 $\omega = 1$ の成分だけ抽出すると、 $\omega_0 = 1, n = 1, T = 2\pi$ であるから、

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

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。

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

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初期位相分布を図 2 (d) に示す。

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の原理

多くの計測法は光学系パラメータ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

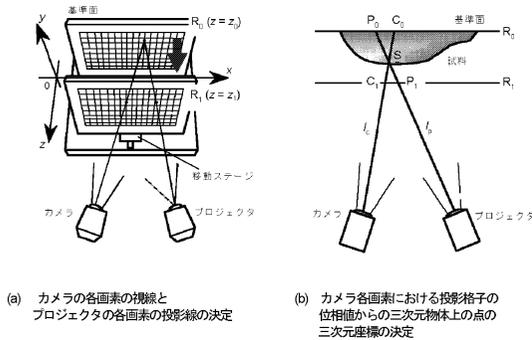


図 8 基準面を用いた三次元形状計測法

Fig. 8 Shape measurement method using reference plane.

ズを中心位置が 1 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に分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最も自然な余弦波に置き換えられ、非常に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 8 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 次元格子をカメラで撮影し、位相解析を行うことで、カメラの撮像面のすべ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 カ所に設置することで、空間上の 2 点が得られるため、すべ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行うことによって、さらに高精度 (100 μm 角程度の大きさの物体で高さ

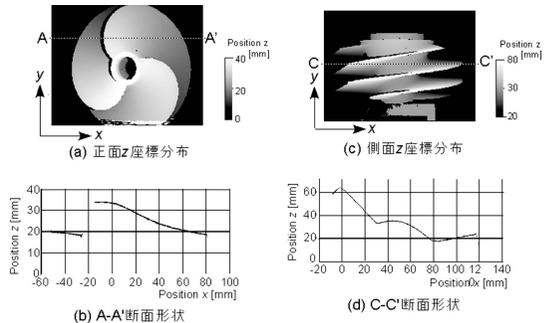


図 9 スクリューの形状計測

Fig. 9 Shape measurement of screw.

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ュー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ことなど、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。

on-axis 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)}。

デジタルホログラフィでは、物体から出た光 (物体

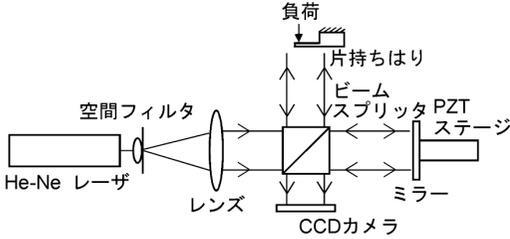


図 10 位相シフトデジタルホログラフィの光学系
Fig. 10 Optical system for phase-shifting digital holography.

光)のホログラム面 (CCD 面)での強度が記録されているが、位相シフトされた複数枚のデジタルホログラムを用いる位相シフトデジタルホログラフィでは、ホログラム面 (CCD 面)での物体光の振幅と位相の情報が解析できる。この情報を逆にフレネル積分することにより、物体の位置での物体光の振幅と位相を解析すれば、物体が再生できる。物体の位置での物体光の変形前後での位相変化を解析すれば、変位分布を計測することができる。

一方、ホログラフィはスペックルが発生し、その強度の弱い部分の物体光の位相値は不正確である。しかし、ホログラムは、その一部を取り出しても、物体の全視野の情報を持っており、フレネル積分により物体光の再生ができる。そこで、ホログラムを分割すると、それぞれのホログラムから再生された物体のスペックルの強度は異なっている。しかし、位相差は同じであるはずだが、強度の弱いところでは、位相差の信頼性が低い。そこで、各分割されたホログラムから再生して得られた位相差の中で、各点で強度が大きい分割ホログラムの位相差を採用して、信頼性の高い位相差のみを利用することにより、精度の良い解析ができる新しい方法を開発した。以下にその原理と実験結果を示す。

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。

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

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

ここで、 α は PZT ステージに取り付けたミラーによ

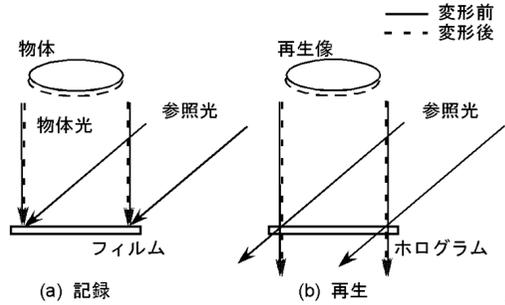


図 11 ホログラフィ干渉法
Fig. 11 Holographic interferometry.

りシフ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 面における参照光が平行光で CCD 面での強度と位相が一定であるとすると、これは物体光と見なせる。この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積分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。このフレネル積分の式を以下に表す。

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

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 (位相差) $\Delta\phi(x, y)$ と面外変位 $w(x, y)$ との関係は以下のように表すことができる。

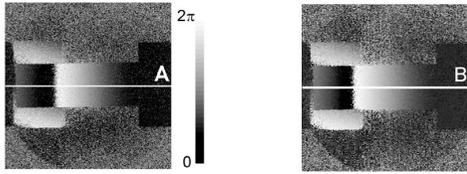
$$w(X, Y) = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi(X, Y) \quad (18)$$

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 10 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 8.1 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) に示す。

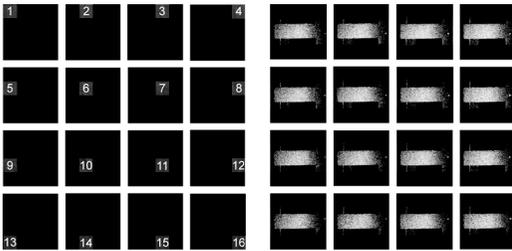
次に、図 13 (a) に示すように、変形前後のホログラムを 240×240 画素に分割し、それぞれの分割した画像から、フレネル積分の式より再生画像として、図 13 (b) に示すように物体光のみの複素振幅画像を得



(a) 全ホログラムから解析 (b) 16分割ホログラムから解析

図 12 片もちりの位相差分布

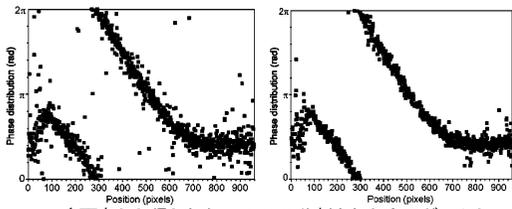
Fig. 12 Phase-difference distribution of cantilever.



(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

Fig. 13 Divided holograms and reconstructed images.



(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差分布

Fig. 14 Phase-difference distributions along center line of cantilever.

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個の位相差の中で最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(b)に示す位相差画像を得た．また，図12(a)，(b)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%に減少した．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，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²⁸⁾．

9. 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)あるいは高精度で求めることができた．また，レーザ干渉に適用した場合はナノメータ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・土木建築工業における構造物の健全性評価や医療福祉分野における計測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, *Handbook on Experimental Mechanics*, 2nd ed., Kobayashi, A.S. (Ed.), pp.969-1029, VCH Publishers, New York (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, pp.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, pp.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, pp.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, pp.116-121 (2003).
- 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: 2nd Volume*, ASTM, STP1323, pp.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, pp.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, 日本機械学会論文誌, Vol.50, No.451 A, p.489 (1984).
- 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, pp.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, pp.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, pp.39-42 (2001).
 - 16) Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Toda, H.: Real-time Shape Measurement by Integrated Phase-Shifting Method, *Proc. SPIE (Interferometry '99, Techniques and Technologies)*, Vol.3744, pp.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*, pp.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, pp.3709-3714 (1994).
 - 19) Fujigaki, M. and Morimoto, Y.: Shape Measurement by Grid Projection Method without Influence of Aberration of Lenses, *Post Conference Proc. VIII International Congress on Experimental Mechanics*, SEM, pp.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, pp.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, pp.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, pp.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, pp.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, pp.546-551 (1987).
 - 25) Creath, K.: Phase measurement interferometry techniques, *Prog. Opt.*, Vol.26, p.350 (1988).
 - 26) Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Iwai, K.: Shape Measurement of Moving Human Body, *Proc. International Conference on Machine Automation (ICMA2000)*, pp.345-350 (2000).
 - 27) Kakunai, S., Iwata, K. and Sakamoto, T.: Profile Measurement by Projecting Two Gratings with Different Pitches, *Opt. Rev.*, Vol.1, No.2, pp.296-298 (1994).
 - 28) Morimoto, Y., Nomura, T. Fujigaki, M. and Takahashi, I: Reduction of Speckle Noise Effect by Divided Holograms in Phase-Shifting Digital Holography, *Proc. 12th ICEM*, pp.554-555 (2004).
 - 29) 村田和美: ホログラフィー入門, pp.62-67, 朝倉書店 (1976).
 - 30) 辻内順平: ホログラフィー, pp.211-229, 裳華房 (1997).
 - 31) Yamaguchi, I. and Zhang, T.: Phase-shifting Digital Holography, *Opt. Lett.*, Vol.22, No.16, pp.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, Vol.37, pp.688-695 (1999).
 - 33) Yamaguchi, I., Kato J. and Matsuzaki, H.: Measurement of Surface Shape and deformation by Phase-shifting Image Digital Holography, *Opt. Eng.*, Vol.42, No.5, pp.1267-1271 (2003).

(平成 17 年 5 月 20 日受付)

(平成 17 年 11 月 18 日採録)

(担当編集委員 久野 義徳)



森本 吉春

1966年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1968年同大学院修士課程修了。同年株式会社小松製作所入社。1974年大阪大学基礎工学部機械工学科助手、1981年工学博士(大阪大学)、1981年講師、1985年助教授。1989年米国バージニア工科大学客員教授(10カ月)、1993年和歌山大学経済学部産業工学科教授。1995年システム工学部創設準備室教授を経てシステム工学部光メカトロニクス学科教授、2005年研究・社会連携担当理事、現在に至る。実験力学、画像計測の研究に従事。日本非破壊検査協会より論文賞を、日本機械学会より論文賞、業績賞を、日本光弾性学会より論文賞を、日本実験力学学会より技術賞を、米国実験力学学会より Lazan 賞を受賞。現在、日本機械学会フェロー、日本実験力学学会会長、精密工学会関西支部商議員、アジア実験力学委員会委員長、米国実験力学学会論文誌国際顧問、中国実験力学学会論文誌国際顧問、日本材料学会、電子情報通信学会、SEM、SPIE、ASME、BSSM、OSA 各会員。



松井 徹

1981年岐阜大学大学院精密工学研究科修了。同年三洋電機中央研究所入社。同年大阪大学工学部機械工学科助手採用。1985年和歌山大学教育学部助手、1988年助教授を経て、1995年システム工学部に転部、現在に至る。CAD・CGの研究を経て、CV・画像計測に従事。日本機械学会、日本設計工学会、日本実験力学学会に所属。



藤垣 元治

1990年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1992年同大学院基礎工学研究科物理系専攻機械工学分野博士前期課程修了。同年株式会社森精機製作所入社。同年株式会社ナブコ入社。技術開発本部研究開発センターにて福祉機器開発と画像検査装置の開発に従事。1995年和歌山大学システム工学部創設準備室助手を経てシステム工学部光メカトロニクス学科助手。2001年博士(工学)取得(大阪大学)。2003年和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科助教授。現在に至る。画像計測、とくに形状変形計測の研究に従事。日本実験力学学会、日本機械学会、日本非破壊検査協会、精密工学会、SEM、SPIE 各会員。