

タイトル	MATLABによる位相シフト干渉法の研究
著者	高井, 信勝
引用	北海学園大学工学部研究報告, 35: 91-106
発行日	2008-02-00

MATLABによる位相シフト干渉法の研究

高井 信勝*

Simulation Study on Phase-Shifting Interferometry with MATLAB

Nobukatsu TAKAI*

Abstract

A computer simulation with MATLAB is presented with respect to the phase-shifting interferometry to reveal the effect of surface roughness of object. To do this, the model of the surface of objects is used, and their roughness is evaluated numerically. It is shown that the phase distribution of surface is measurable by means of the phase-shifting interferometry for the surface roughness less than the standard deviation of approximately $\pi/5$. It is also revealed that the optimum filtering is required to perform successfully the phase unwrapping which is unavoidable for the phase-shifting interferometry.

1. はじめに

光波の干渉は、波長オーダーあるいはまた波長の百分の一オーダーの微細なスケールの基準として利用される。このことから干渉技術は、現代の情報技術の基盤を支える半導体製造において欠かせないものとなっている。それは干渉技術が光の波長を長さの基準にする測定技術で、結果として観測される明暗の干渉縞は、被検物体上の波長オーダーの変化を表しているからである。いま簡単のために光の反射を正反射として考えると、波長 λ の光波が物体で反射するとき、その反射光と参照波との干渉強度を記録して得られる干渉縞は、通常何本かの明暗の縞模様として観測される。このとき、隣り合う干渉縞の間隔ごとに半波長 $\lambda/2$ に相当する表面の凹凸が存在することを示している。したがって、干渉縞の空間密度が高ければ凹凸変動が大きく、空間密度が低くゆったりと変動する場合は凹凸の変動が小さい。たとえば、光波の波長を $\lambda = 1 \mu\text{m}$ （近赤外領域の光）とすると、凹凸の変動が $0.5 \mu\text{m}$ ごとの干渉縞の変動が観測さ

* 北海学園大学工学部電子情報工学科

* Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

れる。このとき、隣り合う干渉縞の間を百分の一の間隔で読み取ると、 $0.005\mu\text{m}$ つまり 5 nm の精度で凹凸の分布を得ることができる。このように、光波の干渉技術は最近特に注目を浴びているナノメートル技術にも欠かせないものとなっている。

しかし、このような干渉計測が直接適用できる反射物体は、表面が鏡面状に研磨された特殊な表面に限定される。その理由は、表面が鏡面状であるときの干渉縞は表面の凹凸変動だけを反映するが、鏡面状にない粗面からの反射光は、ランダム過程にあるスペックルパターンとして観測され、凹凸変動をあらわす干渉縞が得られないからである。そして、現実には、検査物体としては圧倒的に粗面からなる場合が多い。

本稿における位相シフト干渉法^{1)~5)}は、対象物体が鏡面であっても粗面であっても適用できる手法である。この手法では、物体光と参照光の干渉縞を参照波の位相を変化させて、CCDカメラによって、複数回記録する。そして、コンピュータ内部で画像データとして取り扱い、デジタル演算によって表面の微視的でランダムな変動の影響を除去することで、物体表面を出る光の位相分布が算出される。このようなランダム位相の干渉を伴う位相シフト干渉法は、また、物体情報を光学的に秘匿する情報セキュリティの分野でも利用されている^{6)~8)}。

以下、第2節では、位相シフト干渉の説明のための検査物体の表面モデルを記述し、第3節では、対象の位相分布が複数の干渉強度画像から算出できることを述べるとともに、その際に必要な位相接続方法を述べる。第4節では、計算機実験において、検査面のランダム位相量と結像レンズの大きさ（つまり、フィルタリングのフィルタサイズ）を変えたとき、位相シフト干渉法の算出位相へ与える影響を調べる。これを通して位相シフト干渉法が適用できる最適な結像条件を調べる。

なお、この研究における計算機シミュレーションおよび結果の表示には計算機言語MATLAB⁹⁾を用いた。

2. 検査物体表面のモデル

図1にみられるように、反射光の位相は物体表面の凹凸に依存している。言い換えると、物体表面での光の位相分布が測定されると、物体表面の凹凸が光の波長程度の精度で測定できる。あるいはまた、物体表面に微少な波長オーダーの変形が起きると、その変形が光の位相分布の変化としてあらわれる。

しかし、鏡のように磨き上げた物体だけが検査面でない。多くの物体表面は光の波長オーダーでみると、図2に示すような粗面である。ここで、 σ_{rand} は粗面のランダムな位相の標準偏差である。つまり、 σ_{rand} は

$$\sigma_{rand} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\langle h^2 \rangle} \quad (1)$$

である¹⁰⁾。ここで、 h は平均面からの反射面のランダムな変動(面のランダムな凹凸変動)であり、 $\langle \dots \rangle$ は集合平均を意味する。粗面のような反射面は光を乱反射するので拡散面とも呼ばれる。この場合には、一定の参照波との干渉では、物体表面をでる光の位相は表面の凹凸による位相変化だけではなく、粗面であることによる微視的かつランダムな位相が加わるために、干渉強度もランダムに変動するスペックルパターン状の画像として検出される。その結果、物体をでる光の位相を干渉縞の計測から求め、物体表面の微視的変動を除いた平均的な凹凸の分布を求めることはできない。

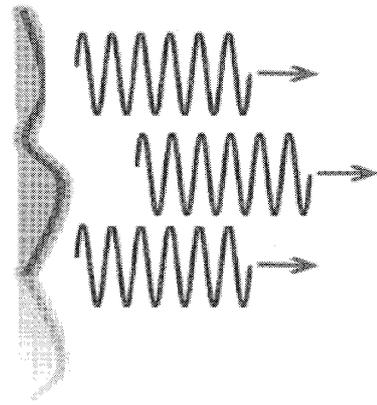


図1 反射光の位相は物体表面の凹凸で異なる

3. 位相シフト干渉法

3.1 干渉強度

位相シフト干渉法は、検査面が鏡面であっても粗面であっても適用できる干渉法で、これによって干渉技術が多方面に利用できるようになった。図3は物体表面の凹凸分布を計測するために用いられる代表的な位相シフト干渉法の光学系である。ここで、左端にある検査面は下方から導かれる平行レーザー光によって照射され、その表面は結像レンズによってCCD光電面に結像される。また、同時にCCD光電面は可動鏡からなる参照面からの一様な光で照射されている。通常、前者を物体光、後者を参照光と呼んでいる。つまり、CCD光電面ではこれら二つの光波の干渉強度が検出され、その画像がコンピュータへ送られる。

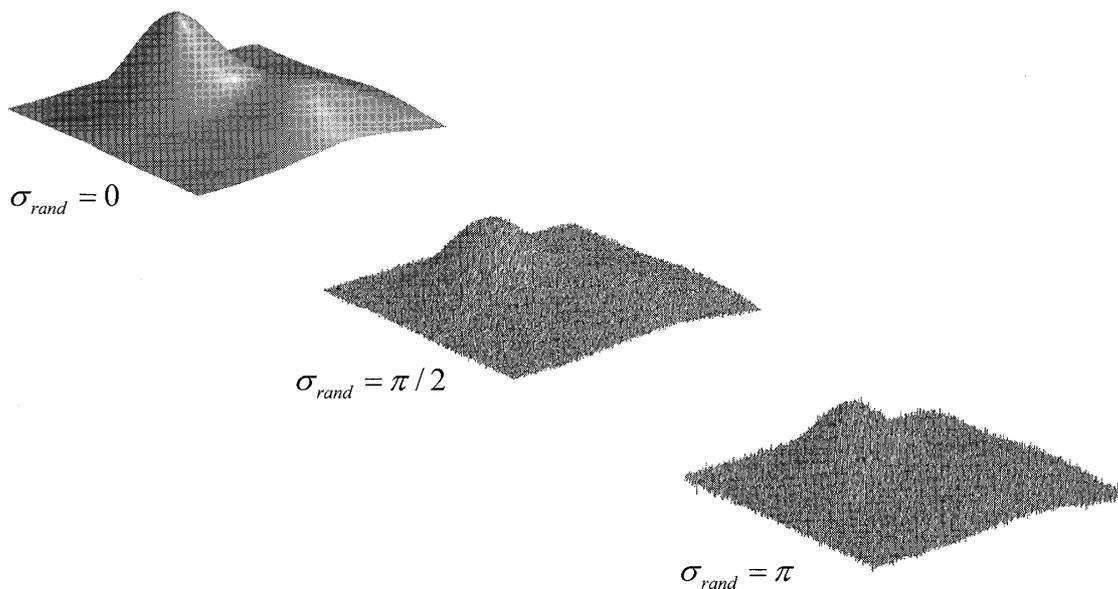


図2 表面の凹凸による位相分布。 σ_{rand} はランダム位相の標準偏差で $\sigma_{rand} = 0$ が鏡面状凹凸の表面、 $\sigma_{rand} = \pi/2$ と $\sigma_{rand} = \pi$ の表面は粗面。

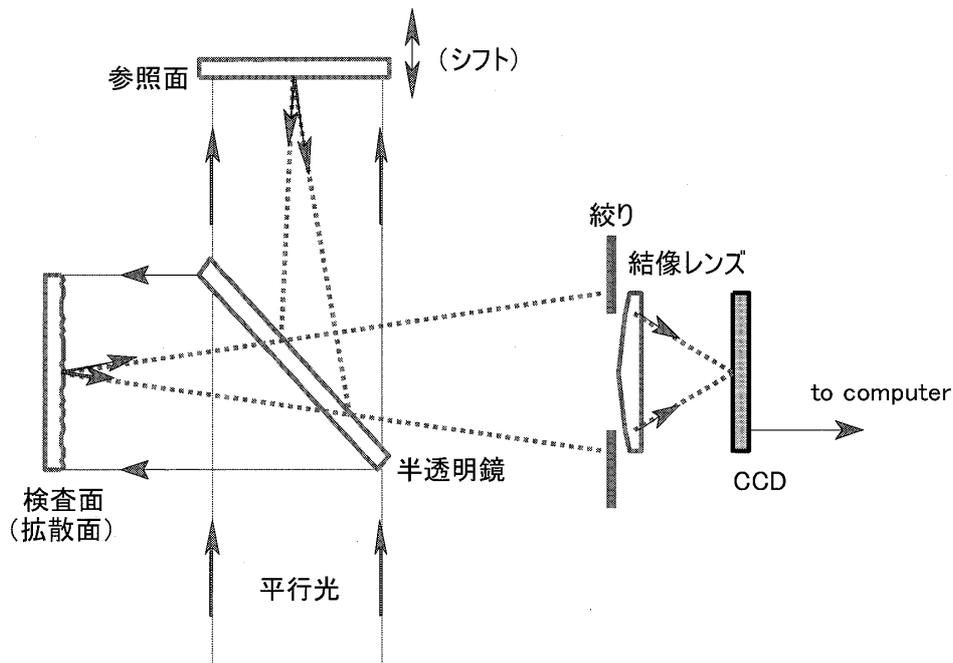


図3 位相シフト干渉計の基本光学系

なお、図3の結像レンズのすぐ前には絞りが付けられている。これは、レンズ開口の大きさを制限するもので、この大きさによってCCD光電面における像の解像度が変化する。その結果、粗面の結像において発生するスペックル粒子の大きさが変化する。つまり、粗面からレンズに達する光は、検査面の回折光であって、絞りによってレンズ中心を含む低周波の回折光だけが通される。そして、その逆変換として背後のCCD光電面に結像される。したがって、レンズ絞りは結像において空間的なローパス（低域）フィルタリングの役割を果たしている。それゆえ、絞りの大きさはローパスフィルタリングにおけるフィルタサイズに他ならず、当然、検出されるスペックル粒子は、レンズ開口が小さいほど大きくなる。位相シフト干渉法におけるこの影響は後に詳しく記述する。

さて、図3の左側にある検査面の表面の反射率は面上どこでも一定で、位相分布だけが異なるとしよう。このとき、CCD光電面での物体光強度を I_{obj} 、一様な参照光強度を I_{ref} とすると、観測される干渉強度 $I(x,y)$ は

$$I(x,y) = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos[\phi_{obj}(x,y) - \phi_{ref}] \quad (2)$$

とかける。ここで、 $\phi_{obj}(x,y)$ と ϕ_{ref} は、それぞれ物体表面をでる光波と参照波の位相である。物体表面が鏡面状の研磨面であるときには、CCDによって観測される干渉強度は、一定の参照波位相に対して物体の表面の凹凸に応じた $\phi_{obj}(x,y)$ の関数として、 \cos 項が周期的に変動する。そのため、物体表面の凹凸に依存した干渉縞が観測される。

粗面からなる検査面の凹凸による反射光の位相 $\phi_{obj}(x,y)$ を、位相シフト干渉法で検出するためには、参照鏡の位置を光軸方向にわずかに^{シフト}移動させる。この移動によって、参照光の位相が変わり、干渉強度が変化するが、移動量を複数回変えて干渉強度を撮影し、コンピュータに取り込む。このとき、位相シフト量を3度変えて3枚の干渉強度を取り込み、解析に用いる方法を3ステップ法と4度変えて4枚の干渉強度を用いる方法を4ステップ法がある。

3ステップ法では、最初の記録における参照波の位相を $\phi_{ref} = 0$ とし、これを基準にして、2度目の記録の位相を $\phi_{ref} = \pi/2$ 、3度目の位相を $\phi_{ref} = \pi$ とシフトさせる。このようにして、3回の記録で得られる干渉強度は、それぞれ、式(2)によって

$$I_1 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos[\phi_{obj}(x,y)] \quad (3)$$

$$I_2 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos[\phi_{obj}(x,y) - \pi/2] \quad (4)$$

$$I_3 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos[\phi_{obj}(x,y) - \pi] \quad (5)$$

と表される。ここで、左辺の I_1, I_2, I_3 がコンピュータに画像として取り込まれる3つの干渉強度データである。一般的には、これらも (x,y) の関数であるがその記述は省略してある。

注意すべきことは、式(3)～(5)に含まれる位相 $\phi_{obj}(x,y)$ は、物体表面の凹凸の分布とランダムな微視的位相の両方からなっていることである。つまり、

$$\begin{aligned} \phi_{obj}(x,y) = & \text{巨視的な凹凸によるなめらかな位相成分} \phi(x,y) \\ & + \text{微視的でランダムな位相成分} \phi_{rand}(x,y) \end{aligned}$$

と表されてよい。したがって、後者が小さく無視できるときには、ゆったりとした凹凸分布に応じた干渉強度が得られるが、一般には、後者が存在しており、それによってランダムな干渉強度になる。このように干渉強度は後者が加わる度合いによって大きく変化する。以下では、ランダムな位相成分を式(1)の標準偏差 σ_{rand} で評価した。

位相シフト干渉法は、コンピュータに取り込まれた式(3)～(5)で表される検出画像データから \cos 項に含まれる位相 $\phi_{obj}(x,y)$ を求める干渉技術で、この手法は鏡面、粗面とも関係なく有効である。求める位相は、コンピュータに取り込まれた検出画像データである式(3)～(5)において I_{obj} と I_{ref} を消去すると、

$$\phi_{obj}(x,y) = \tan^{-1} \left[1 - \frac{2(I_2 - I_1)}{(I_3 - I_1)} \right] \quad (6)$$

が容易に得られる。つまり、検出画像データである I_1, I_2, I_3 の各画素データに関して式(6)を計算すると、位相分布 $\phi_{obj}(x,y)$ が強度分布から算出される。これが、位相シフト干渉法の基本

原理である．なお，4ステップ法では参照波の位相を $\phi_{ref} = 3\pi/2$ としたときの干渉強度の画像データ I_4 を用いる．この場合には，物体の位相分布は

$$\phi_{obj}(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1}\right) \quad (7)$$

の演算によって求めることができる³⁾．しかし，以下では3ステップ法に限って記述する．

3.2 位相のラッピング

まず，式(6)によって得られる位相分布を調べてみよう．そのために，物体の凹凸による光の位相分布として，図2に示すような最大値が 6.74π のゆったりとした位相分布にガウス乱数で与えたランダムな位相変動を加えた位相分布を作成した．続いて，この位相分布をもつ振幅分布の物体表面から結像レンズまでの伝搬を2次元フーリエ変換で求め，その面で結像レンズが有限サイズであることによるローパスフィルタリングをマスクをかけることで行った．さらに，その結果を逆フーリエ変換することでCCD光電面の振幅分布を求めた．一方，参照波は，簡単のために，位相が $\phi_{ref} = 0$ ， $\phi_{ref} = \pi/2$ ， $\phi_{ref} = \pi$ と異なる3種の平面波で与えた．そして，CCD光電面で式(3)～(5)で与えられる物体波と参照波の干渉強度を求めた．図4は，干渉強度の画像データ I_1 ， I_2 ， I_3 の一例である．

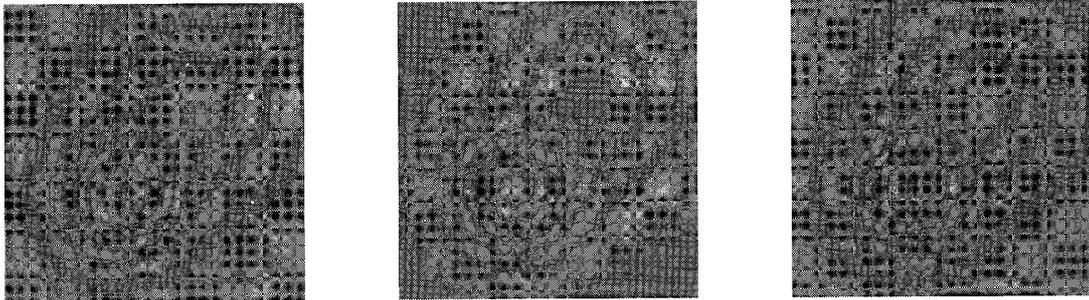


図4 3ステップ法の干渉強度 ($\sigma_{rand} = 0.2\pi$ の場合)．参照波の位相は，左から $\phi_{ref} = 0\pi$ ， $\phi_{ref} = \pi/2$ ， $\phi_{ref} = \pi$ ．位相分布の最大値は $\phi_{0max} = 6.74\pi$ ．画像サイズは 256×256 ．

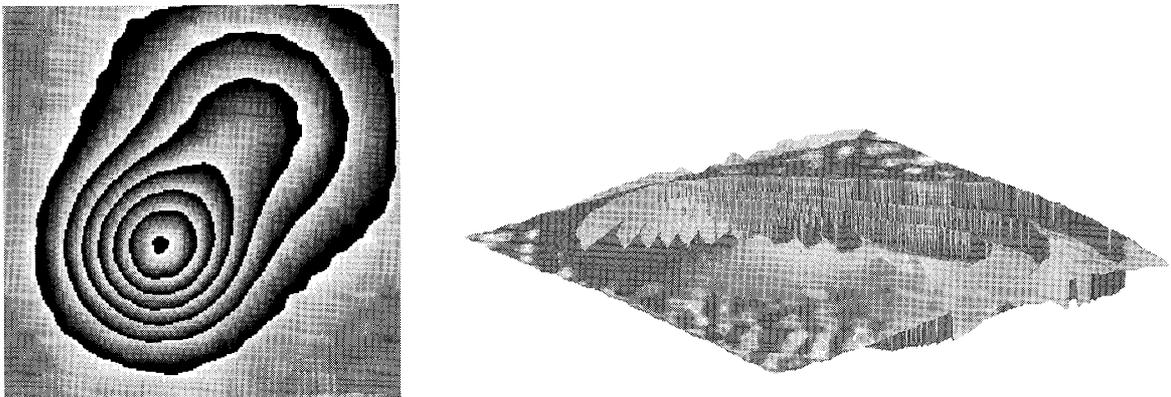


図5 式(6)に基づいて算出された位相分布．2次元表示(左)と3次元表示(右)．

3つの干渉強度の画像パターンが求まると、式(6)を用いて位相分布を計算できる。図5は、各画素について式(6)に含まれる逆タンジェントを計算して得られた結果である。図5に示されている2次元表示からは、鮮明に位相分布が得られているように見える。しかし、これが求めようとする物体表面の位相分布ではない。なぜなら、逆タンジェント関数は一般に多価関数で、MATLABをはじめとする数値計算では $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ の範囲の主値が出力される。そのため、この範囲を超える位相値は、同じ値を与える主値範囲に置き換えられる。このように、位相の値が主値範囲にたたみ込まれるので、これを位相がラッピング (wrapping) された分布と呼んでいる。

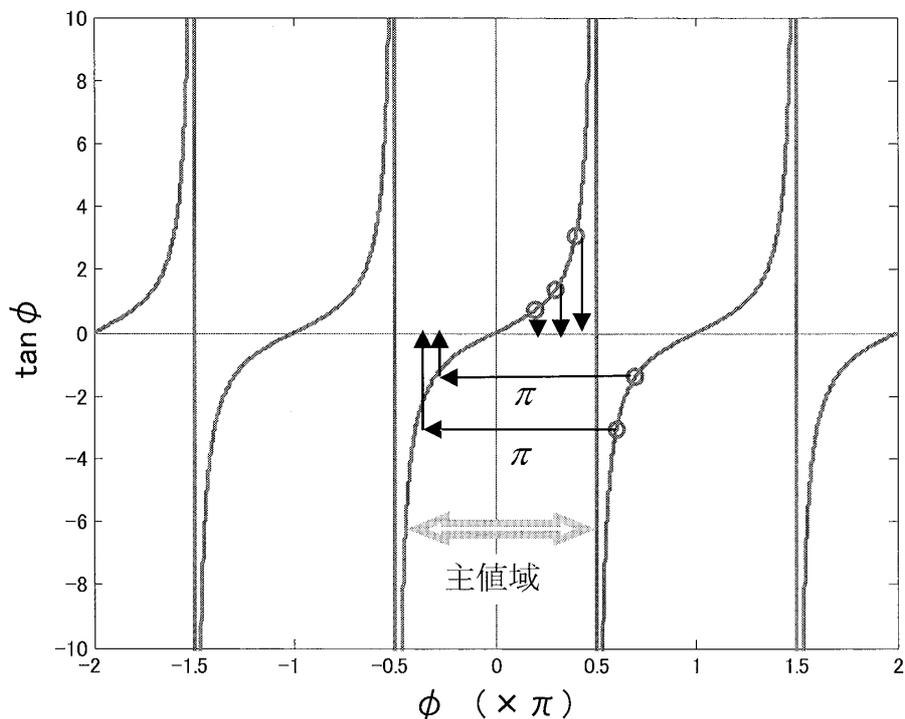


図6 逆タンジェント関数のラッピングを説明する図。縦軸の $\tan \phi$ の値から横軸の位相 ϕ の値を求めるとき、計算機では主値域 ($-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$) の値として位相値が出力される。

3.3 位相接続アルゴリズム (アンラッピング)

図5にみられる位相のラッピングは、逆タンジェント演算の結果としての位相値が $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ の範囲の主値が出力された結果である。そこで、図6に示すタンジェント関数に立ち返って考えてみると、逆タンジェント関数は、タンジェント値 $\tan \phi$ が与えられたときに、位相 ϕ を求める演算であるので、結果は多価である。したがって、逆タンジェント関数を用いて位相を求める際には、位相のラッピングを解消する作業—これをアンラッピング (unwrapping) という—が必要である。ところが、位相のアンラッピングを実行する絶対的な手法はなく、求めようとする位相の振る舞いを想定してアンラッピングの方策を立てなくてはなら

ない。

図7（上）はラッピングされた位相分布の1ライン（行）の一例である。ここにみられるようにラッピングされた位相分布では、位相値が $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ の範囲の内部では連続的に変化するが、この範囲をはみ出すたびに不連続に変化する。したがって、この不連続に変化するときの位相の飛びを考慮に入れると、不連続分布を解消して連続分布を得ることができる。位相シフト干渉法では、このような考え、つまり「求めようとする位相分布は緩やかに変化し、急激な変化を含まない」ということを前提にして、位相のラッピングで生じた急激な変化を滑らかな変化に回復する。

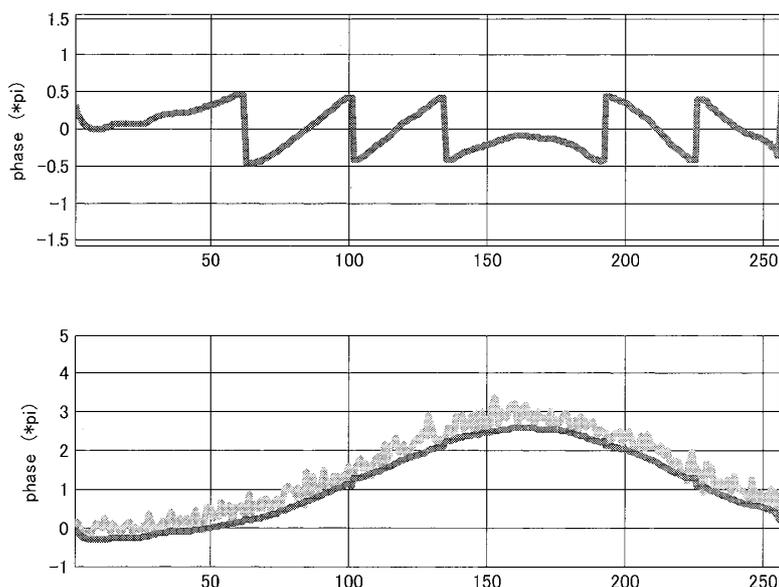


図7 ラッピングされた位相分布（上）とそれを位相接続によって解消した位相分布。下の図は、算出された位相分布（滑らかな実線）とランダム位相を伴う物体表面の位相分布とを比較した結果。1ラインの1次元分布の場合。

このアンラッピング処理は「位相接続」とも呼ばれる。具体的には、アンラッピング処理は、図7の上段に示すような画像データの1ライン（行）ごとに、以下の2点からなる判断処理を用いて行われる。

- (1) k 列目と $(k+1)$ 列目の画素値を比較して、それが増大しており、かつその間の画素値の差が大きく（実際には $\pi/4$ 以上）、かつ急落するときには、「ゆっくり増大している」とみなして π を加える。
- (2) 逆に、 k 列目と $(k+1)$ 列目の画素値を比較して、それが減少しており、かつその間の画素値の差が大きく（実際には $\pi/4$ 以上）、かつ急上昇するときは、「ゆっくり下降している」と見なして π を引く。

このような位相接続法は、100%とは言えないが、多くの場合成功する。ただし、データが複

雑に変動するときには、誤差が大きいときがあり、結果のデータにばらつきが生じやすい。このような影響を軽減するために、プログラムの後半では、平滑化処理が用いられている。

図8が、図5の結果に対して位相接続を行い、さらに平滑化処理を施して得られた再生位相分布である。これから、ランダム位相が加わっているにもかかわらず、図2にみられる巨視的な位相分布が、ほぼ回復されることがわかる。

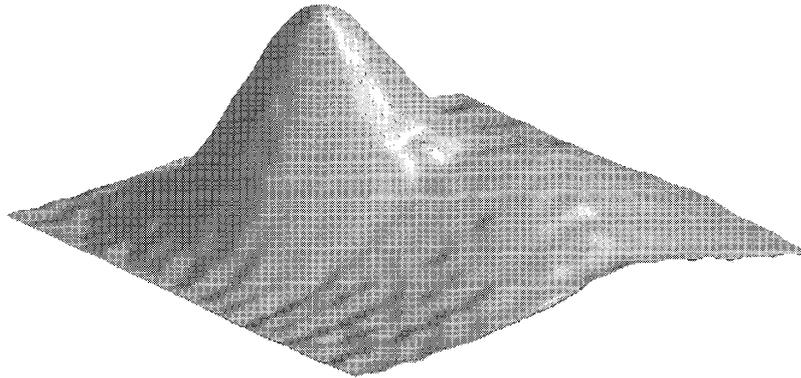


図8 再現された位相分布

4. 実験

ここまで物体表面が微視的でランダムな位相分布をもつときの位相シフト干渉法を説明した。以下の計算機実験では、検査面のランダム位相量と結像レンズの大きさ（つまり、フィルタリングのフィルタサイズ）を変えたときに関して、これらが算出位相へ与える影響を調べた。実験におけるデータ（画像）サイズは、物体面、レンズ面、検出面のいずれにおいても 256×256 である。

4.1 ランダム位相の影響

粗面を特徴付けるランダム位相が、位相シフト干渉法の算出位相に与える影響を調べた。ここでは、結像レンズの大きさすなわちフィルタサイズを 32×32 に固定し、ランダム位相の標準偏差 σ_{rand} を種々に変えて調べた。図9(a)~(c)は、そのうちの $\sigma_{rand} = 0$ 、 $\sigma_{rand} = 0.4\pi$ 、 $\sigma_{rand} = 0.6\pi$ の場合の結果である。ここで、(a)~(c)の各図において、上段に粗面の位相の3次元分布（左）と2次元位相分布（右）を示している。一方、下段には、式(6)の直接の結果であるラッピングされた位相分布（左）とアンラッピングを行った結果の2次元位相分布（右）を示してある。したがって、上段と下段の右側に位置する2つの位相分布が同一パターンであれば、位相シフト干渉法で検査物体の位相分布が首尾良く得られていることになる。

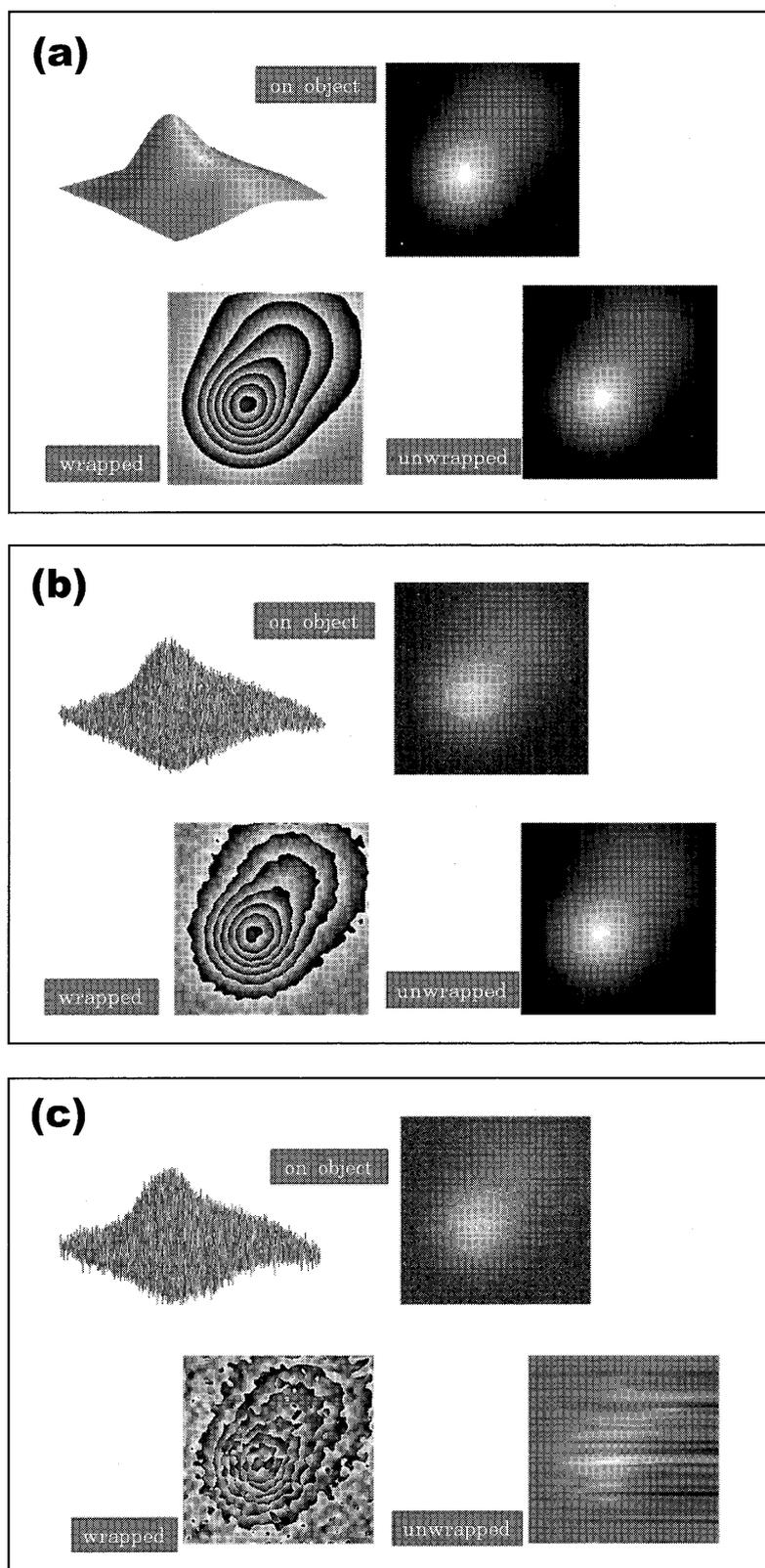


図9 ランダム位相の標準偏差が^a(a) $\sigma_{rand} = 0$, (b) $\sigma_{rand} = 0.4\pi$, (c) $\sigma_{rand} = 0.6\pi$ に対する物体上の位相分布 (上段) と算出された位相分布 (下段). 下段の左はラッピングされた (折りたたまれた) 位相分布, 右はアンラッピング後の位相分布. フィルタサイズ 32×32 .

以下に、図9 (a)～(c)の結果に見られる位相シフト干渉法で算出された位相分布についてコメントする。

- (a) $\sigma_{rand} = 0$ の場合には、物体位相分布と算出位相分布はよく一致して得られている。これは、鏡面物体上の位相分布の測定に相当し、ラッピングされた位相分布パターンに不規則な乱れはなく、位相接続が完全な形でなされた結果である。
- (b) $\sigma_{rand} = 0.4\pi$ の場合には、上段に示される物体表面の粗面状態はかなり粗い構造を呈していて、それに伴って、ラッピングされた位相分布にも等位相の輪郭線に乱れが現れる。しかし、ここに見られる程度の乱れに対しては位相接続処理は成功している。このことは、アンラッピング後の位相分布のパターンが物体表面の分布に一致して得られていることから分かる。
- (c) $\sigma_{rand} = 0.6\pi$ とランダム位相がさらに大きな値になると、ラッピングされた位相分布は、大きく型くずれし、ランダム位相の影響を強く受けていることが認められる。そして、結果として、位相接続処理において大きな誤差が現れ、アンラッピング後の位相分布に著しい欠陥が生じている。

4.2 ローパスフィルタリングの影響

前述したように、結像レンズの絞りの大きさを変えることは、CCD光電面にできる像の空間周波数帯域を制限していることに相当する。つまり、レンズ面を通過する光をレンズ開口で制限すると、像の空間周波数特性が変わり、これに一樣な参照光を重ねて得られる干渉強度パターンもその影響を受ける。ここでは、このフィルタサイズを変えたときの影響について実験で調べた。なお、この研究ではレンズ面の大きさは 256×256 であり、これをフルサイズとして、レンズ開口の大きさを (10×10) から (60×60) までとびとびに変化させた。ここで、 (10×10) というのは、レンズ面中心の (10×10) ピクセルの方形領域だけを光が通過できることを意味し、狭帯域のローパスフィルタリングに相当する。これに比べて、 (60×60) の場合はレンズ開口の一辺が (10×10) の場合の6倍の広帯域のローパスフィルタリングに相当する。

図10にはランダム位相の標準偏差 σ_{rand} が $\sigma_{rand} = 0$ 、図11には $\sigma_{rand} = 0.4\pi$ の場合のフィルタサイズの影響を示してある。これらの結果において、おのおの上段はラッピングされた位相分布、下段はアンラッピング後の位相分布である。図10は、 $\sigma_{rand} = 0$ すなわち鏡面状の検査面に対する結果で、これをみると、フィルタサイズが (30×30) より大きいときには連続的に変化する位相分布が問題なく得られている。しかし、これより小さい (10×10) と (20×20) の結果は、干渉縞自体が大きく乱れたものになっていて、これに伴って誤った位相接続が一部に生じていることがアンラッピング後の位相分布にみられる。

狭帯域フィルタリングによる同様な現象が、粗面の検査物体の場合 ($\sigma_{rand} = 0.4\pi$ の場合) で

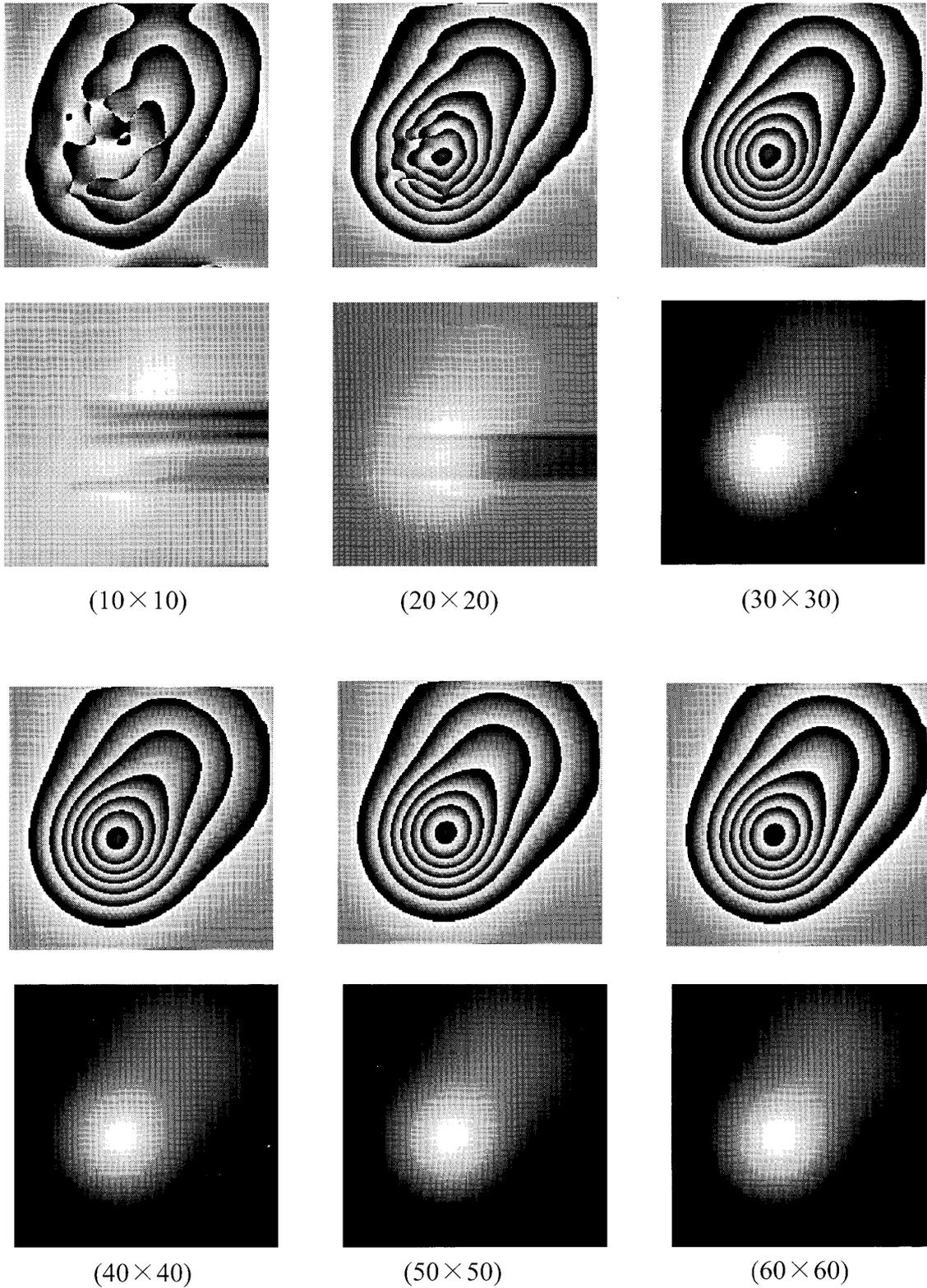


図10 $\sigma_{rand} = 0$ の場合に、フィルタサイズを $(10 \times 10) \sim (60 \times 60)$ と変えて算出されたラッピング位相分布 (上段) とアンラッピング後の位相分布 (下段).

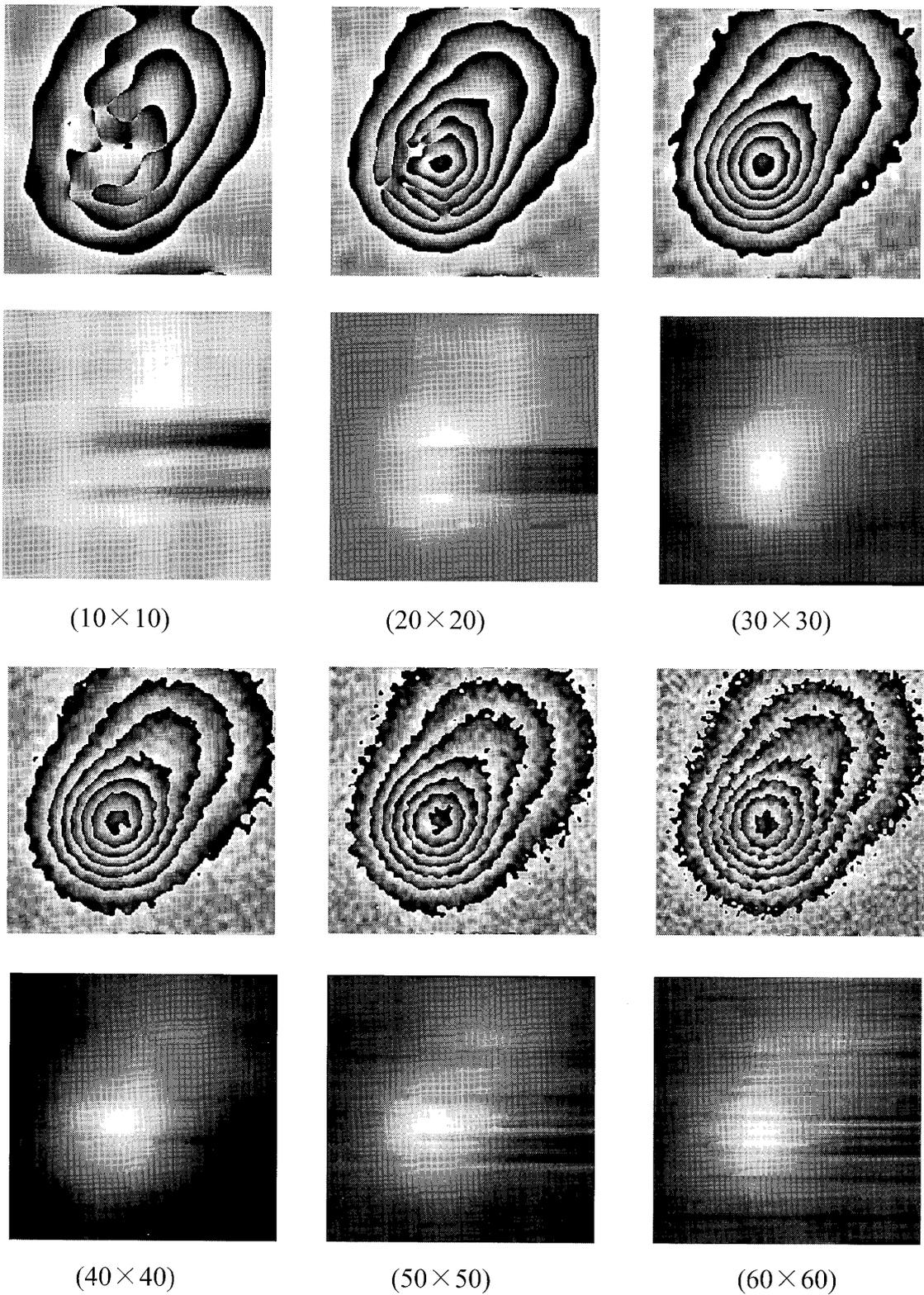


図11 $\sigma_{rand} = 0.4\pi$ の場合に、フィルタサイズを $(10 \times 10) \sim (60 \times 60)$ と変えて算出されたラッピング位相分布（上段）とアンラッピング後の位相分布（下段）.

ある図11の結果にも現れている。したがって、この現象は、粗面の状態に無関係にフィルタサイズが小さいことに因る結果と考えられ、フィルタリングの効果が検出される像の状態を大きく乱しているものと解釈できる。つまり、フィルタサイズしたがってレンズサイズが小さすぎて解像度が低下した歪んだ位相像が生じていると考えられる。

粗面に対する図11の結果では、フィルタサイズを大きくすると、ラッピングされた位相分布を表す干渉縞の輪郭に複雑な乱れが生じ、この乱れはフィルタサイズが大きいほど著しいことがわかる。したがって、フィルタサイズを $(40 \times 40) \sim (60 \times 60)$ と大きくしていくと、それが大きいほど位相接続に誤差が現れている。しかし、フィルタサイズが中ぐらいの (30×30) では、干渉縞はかなり乱れているにもかかわらず、位相接続は成功していてアンラッピング後は正しい位相分布が得られていることがわかる。

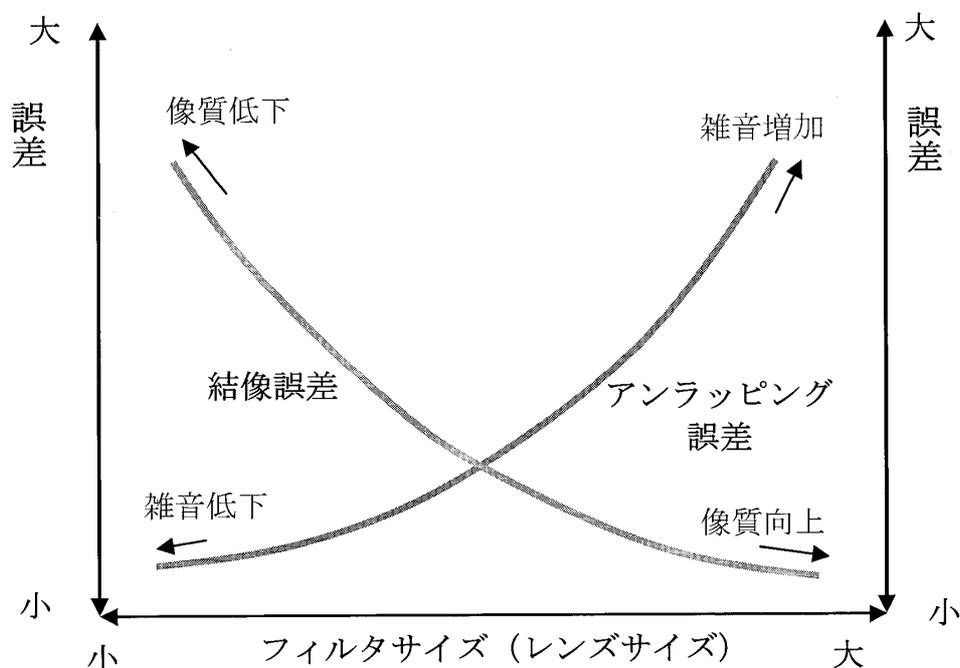


図12 フィルタサイズに関する結像誤差とアンラッピング誤差がトレードオフの関係になることを示す図。

このようにランダム位相が伴うと、干渉像そのものに影響する狭帯域フィルタリングの効果とは別に平滑化処理では除去できないスペckル雑音を生じる広帯域フィルタリングの影響が問題になる。つまり、スペckル雑音を除去する目的で狭帯域フィルタリングを施すと、それによって干渉像そのものが変化するし、逆にその変化を小さくするためにフィルタサイズを大きくとると、干渉像そのものは精度が上がるが、スペckル雑音の影響を強く受けて、位相接続時のアンラッピングに欠陥が現れる。このように、フィルタリングの効果は、干渉像の像質と位相再生の両方にとってトレードオフの関係がある。図12はこの関係を模式的に示したもの

である。

5. おわりに

本稿では、最初に、3ステップ法の位相シフト干渉法を検査物体の表面が、一般には、粗面であることを考慮して記述した。そこでは、手法自体が基本的に位相のラッピングを伴うことを説明するとともに、そのアンラッピングによる位相接続のアルゴリズムを記述し、計算機によるいくつかのシミュレーションを提示した。

具体的な実験としては、2つの計算機シミュレーションを行った。一つは、物体表面の微視的でランダムな位相量を変化させ、位相接続に及ぼす影響を調べた。これによって、ランダム位相の標準偏差が 0.4π 程度の場合には位相接続が達成されることを示した。つまり、標準偏差値で波長の $1/5$ 程度以内の位相揺らぎに対して干渉計測ができる。

もう一つは、結像におけるフィルタリングの影響を調べた。つまり、結像レンズのサイズを、種々の表面粗さに関して変えてアンラッピングの成否を調べた。この結果、極度にレンズを絞り込むと、正しい物体像（実際には位相分布の像）が得られないことによるエラーが生じる。また、フィルタサイズを大きくして像の解像度を上げると、同時にスペckル雑音が顕著になり、干渉強度分布が微細でランダムな構造になるために、アンラッピングによる位相接続に失敗する。このようにフィルタリングに関しては、適度なフィルタリングでなければならないことが判明した。

本研究は、北海学園大学ハイテクリサーチセンター事業の研究プロジェクト「視覚・画像・音声・言語情報処理の高度化と知的計測制御技術への応用」の一環として行った。

参考文献

- 1) C. Joenathan: 'Phase-measuring interferometry: new methods and error analysis,' *Appl Opt*, 33, 4147-4155(1994).
- 2) J. M. Huntley: 'Suppression of phase errors from vibration in phase-shifting interferometry,' *J Opt Soc Am A*, 15,2233-2241 (1998).
- 3) P. Rastogi: 'Measurement of static surface displacements, derivatives of displacements, and three-dimensional surface shapes-examples of applications to non-destructive testing,' in *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, ed. Pramod K. Rastogi, John Wiley & Sons, LTD, Chichester, pp.141-224 (2001).
- 4) A. Patil and P. Rastogi: 'Approaches in generalized phase shifting interferometry,' *Opt Lasers Eng*, 43, 475-490 (2004).
- 5) A. Patil, B. Raphael, and P. Rastogi: 'Introduction of stochastic methods to phase-shifting interferometry,' *J Mod Opt*, 52, 33-44 (2005).
- 6) E. Tajahuerce, O. Matoba, S.C. Verrall, and B. Javidi, 'Optoelectronic information encryption with phase-shifting interferometry,' *Appl Opt*, 39, 2313-2320 (2000).

- 7) L. Z. Cai, M. Z. He, Q. Liu, and X. L. Yang, 'Digital image encryption and watermarking by phase-shifting interferometry,' *Appl Opt*, 43, 3078–3084 (2004).
- 8) M. Z. He, L. Z. Cai, Q. Liu, and X. L. Yang, 'Phase-only encryption and watermarking based on phase-shifting interferometry,' *Appl Opt*, 44, 2600–2606 (2005).
- 9) 高井信勝：「MATLAB入門」(増補版) (工学社, 2002).
- 10) 高井信勝：レーザ光散乱による表面粗さ計測, *精密工学会誌*, 64, pp.1304–1307 (1998).