



位相シフトしながら連続取り込みしたスペックル画像を用いる高精度位相測定*

安達正明** 北川洋一*** 松本哲也*** 中里一茂*** 稲部勝幸†

High-accurate Phase Measurement of Specklegram using Images Continuously Captured under Slow Phase-shifting

Masaaki ADACHI, Youichi KITAGAWA, Tetsuya MATSUMOTO, Kazumo NAKAZATO and Katsuyuki INABE

A new technique which can measure speckle phase with high accuracy is proposed. The technique continuously captures about 100 images under slow phase-shifting and then calculates phase data about each captured image. The calculated phase data are averaged along the capturing order to suppress the noise components due to air fluctuation and vibration of circumstance. Only the average, without other filtering, is not enough to suppress noise which are caused by low modulation data in specklegrams. Therefore, the average is combined with the data replacing which replaces low modulation data with high modulation data around them. The well-known median filter is also combined. With the combined method the fluctuation of phase data is extremely improved. Utility of the combined method is demonstrated through a practical deformation measurement

Key words: speckle interferometry, phase, accurate measurement, phase shift, deformation measurement

1. 緒 言

粗面の微少な二次元変形や移動量の評価にはスペックル干渉法が有用である。特に位相シフト法と組み合わせた方法は高精度な定量測定が可能であり、変形や移動以外に粗面の3次元形状計測等でも新しい応用が期待されている¹⁾。

位相シフト法と組み合わせる時、対象とする物理量の測定精度は位相の測定精度に強く依存する。故に、スペックル画像の位相をより精度良く測定する方法の開発は依然、重要な研究テーマと言える。

光学表面が作る干渉画像に位相シフト法を適用して得られる位相データは光学表面の形状計測や粗さ測定に非常に有用であり、Schwider²⁾, Zhao³⁾, Joenathan⁴⁾, Creath⁵⁾ら多くの研究者が位相シフト法の精度向上に取り組んできた。外部振動や空気じょう乱の影響低減法、シフト誤差の低減方法、光電変換素子の非線形性や多重干渉光成分の影響低減法、さらにはA/D変換器の分解能の影響などについて議論がなされてきている。

光学表面の位相測定に比べ、スペックル干渉画像では位相測定の精度改善は難しい。その理由の1つは、スペックル画像の特徴から来ることだが、モジュレーション(光路差を変えた時の干渉光強度変化の振幅)が相対的に小さく、また画素ごとに大きく違うことである。その結果、取り込んだ画像がA/D変換器の分解能や電気雑音の影響を強く受けやすい。他の理由として、位相シフト量に大きな誤差が入りやすいこともあげられる。スペックル干渉計では応用上、測定対象物と光学系が離れ、空気じょう乱や外部振動の影響を受けやすいのである。この問題に関しては、スペックル干渉計の位相シフトのずれをスペックル位相の統計分布を用いて評価し、位相測定誤差を低減する方法をこれまでに門野ら⁶⁾や安達ら⁷⁾が提案している。

近年コンピュータの性能向上やアナログICの高性能化により、短時間に多くの画像を取り込み、大容量のデータでも高速処理することが可能になって来ている。そこで我々は、静止粗面に対し、位相シフトしながらスペックル画像を連続的に多数枚取り込み、これらのデータからスペックルの位相を高精度に評価する方法を研究した。この方法の利点は、多数枚を時間を掛けて取り込み平均処理することにより、その間の空気じょう乱を平均化し電子的雑音を抑え、かつA/Dの分解能も実質的に上げられることである。ここで、位相シフトしながら連続して取り込んだすべてのスペックル画像の位相を計測する方法には、我々がすでに報告している手法⁸⁾を用いることにした。

最終的な目標は位相測定の高精度化である。研究を進める中で、連続取り込みとデータの平均処理だけでは精度向上に限界があることが分かった。しかし、他の方法と組み合わせると予想以上の精度向上を達成できることが確認できた。

組み合わせた方法の1つは測定データの置き換えである。スペックル画像では、モジュレーションの小さな多くの点が存在する。そこで、測定点のモジュレーションが小さい場合は、周辺のモジュレーションが大きな点のデータで、測定点のデータを置き換えた。この置き換え以外に、測定結果に対しメディアンフィルタをかける方法も用いた。

上に述べた方法はそれぞれ単独で用いても測定精度は向上する。しかし、すべての方法を併用すると位相測定値の標準偏差は最終的に0.034radまで改善できた。連続取り込みを除外すると標準偏差は0.065radとなった。最後にすべてを併用する方法を用いた変形測定の結果についても述べる。

2. 測定方法

説明の都合上、提案する方法の内容を述べる前に、測定に用いた光学系を示す。

2.1 実験光学系

用いたスペックル干渉光学系を上方から見たものを図1に示す。光源はHe-Neレーザ(出力20mW)であり、レーザ光ビームを対

* 原稿受付 平成11年1月22日

** 正会員 金沢大学大学院(金沢市小立野2-40-20)

*** 兵庫県立工業技術センター(神戸市須磨区行平町3-1-12)

† 金沢大学工学部

物レンズで広げ、粗面にカメラ方向から照射する。粗面は2枚のアルミニウム板を上下に間隔を空けずに並べ、左右の端のみを前後からアルミニウム板で挟み、鏡面反射を避けるために酸化マグネシウムを吹き付けたものである。この左右端を支柱で固定し、下方のアルミニウム板のみ後方から圧電素子で押せるようにした(圧電素子は4章で述べる変形測定で使用)。これらをカメラレンズの前方約1mに配置した。カメラレンズはAFズームニッコール35-105を用い、上方のアルミニウム板の25mm×25mmの領域をCCDカメラの画素300×300に取り込めるように調整した。参照光路には位相シフトのためのミラーを置き、ミラーを後方から圧電素子で押せるようにした。参照光ビームは物体光と同様の方法で広げてから、カメラ受光面にビームスプリッターを介して正面から入射させた。参照光路の偏光板は光強度制御に用いる。コンピュータに装着した画像取り込みボードはメモリを搭載しており、画像を8ビットA/D変換しながら30枚/sの速度で100枚以上取り込める。実験では、連続して3枚取り込んだ後、コンピュータのメインメモリ上で加算し、10ビットの画像1枚として扱えるようにした。その後、参照光路の圧電素子を用いて光路差を5nm前後大きくし、再度新しい画像を取り込んで同じように処理し、これらを100回繰り返して、実質的に10ビット画像を100枚コンピュータ内のメモリに取り込んだ。

2.2 高精度位相測定のための方法

2.2.1 連続取り込み画像から位相を測定する方法

図1の参照光路の圧電素子を用いて、位相シフトしながら連続して取り込んだ100枚の画像(j=1~100)について、シフトに伴うある画素P1, P2, P3の光強度変化を図2に示す。この変化を基に、図のように画素P1の光強度の最大値, 最小値, その中間値を自動計算する。次に、光強度がそれらの値となる画像の番号を求め、これらをj=C1, C2, C3, C4, C5とする。そして、C1の時点での位相データφ(x,y)をj=C1~C4の画像の光強度I_{j(x,y)}から4画面位相シフト法で以下のように求める*。

$$\phi = \arg\{(I_{C1} - I_{C3}) + i(I_{C4} - I_{C2})\} \quad (1)$$

ここでiは虚数, argは複素平面での偏角であり, 画素の位置を示す(x,y)は表現の簡略化のため省いた。

位相シフトに伴う強度変化の平均と振幅が分かっている時, 任意時点での光強度値から位相の絶対値をcos⁻¹の演算で求めることができる。しかし符号は, なんらかの補助手段によらないと決定できない。安達らはある1時点での位相が分かっている場合, 任意時点での符号を含めた位相が, 光強度値からcos⁻¹を用いて計算されたある量の統計処理結果で決定できることを報告した⁹⁾。

ここでは, 報告されている統計処理法よりさらに高速で高精度

* 位相がπ/2ずつ大きくなる時の干渉光強度I_{C1}, I_{C2}, I_{C3}, I_{C4}を用いると, 4画面位相シフト法では, I_{C1}時の位相φがφ=tan⁻¹{(I_{C4}-I_{C2})/(I_{C1}-I_{C3})}で与えられる(モジュレーションI_wを用いるとI_{C4}-I_{C2}=2I_wsinφ, I_{C1}-I_{C3}=2I_wcosφであるため)。このφは-π/2<φ<π/2の時, 複素平面で虚数軸に(I_{C4}-I_{C2}), 実数軸に(I_{C1}-I_{C3})を採った時の複素数の偏角と同じになる。しかし, 位相φがπ/2より値を大きくし(I_{C1}-I_{C3})が負になった時, tan⁻¹{(I_{C4}-I_{C2})/(I_{C1}-I_{C3})}で与えられるφは-π/2<φ<0となるが, 複素平面での偏角は正しくπ/2<φ<πを与える。一方, φが値を小さくして-π<φ<-π/2となった時もtan⁻¹の式は正しいφを与えないが, 偏角は正しいφを与える。すなわち, tan⁻¹{(I_{C4}-I_{C2})/(I_{C1}-I_{C3})}は-π/2<φ<π/2の範囲でしか正しい位相を与えない(これ以外の範囲では(I_{C1}-I_{C3})の符号を基にした補正を必要とする)。しかし, 複素平面の偏角は本文に必要な-π<φ<πの幅2πの範囲で正しい位相φを与える。最近のプログラム言語では, 複素平面での偏角を計算する内部関数を持つものもあり, さらに本論文では式(2)以降でも複素平面と偏角を扱うので, 式(1)の表現を用いた。

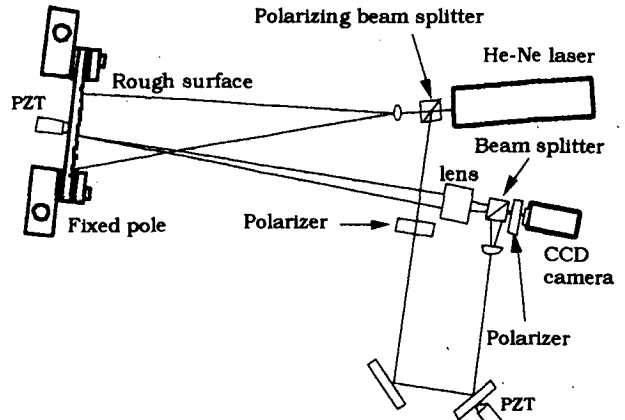


Fig.1 Optical layout. PZT denotes a piezo actuator

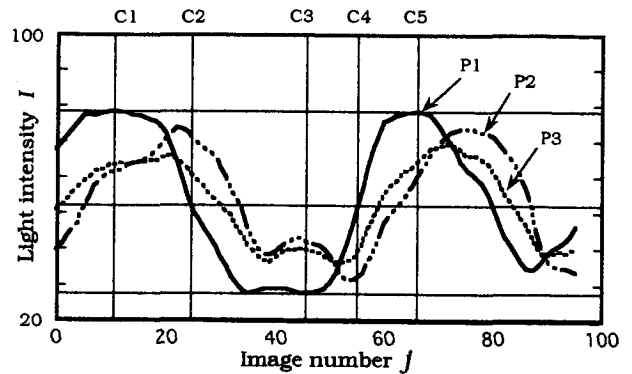


Fig.2 Light intensity change under slow-phase shifting. C1, C2, C3, C4 and C5 denote images, which have π/2 in phase difference from each other

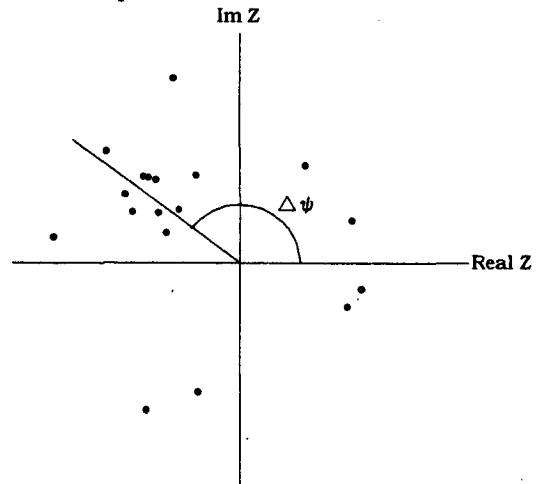


Fig.3 Polar-coordinate expression of the values calculated with Eq. (2). These values are about a local area (3×3) around a measurement position

な位相計算が可能となる処理法を用い, 図2の横軸に示すすべての読みとり時点(j=1~100)での位相データを求めた。用いた統計処理計算の様子を図3に示す。図3では測定対象とする画素の光強度の位相シフトに伴う最大値をI_{max}(x,y), 最小値をI_{min}(x,y), 基準とする1時点での位相をφ(x,y), 着目した時点での光強度をI_j(x,y)とすると, 下記の複素数Z(x,y)を, 測定画素を中心とする3×3の画素に関し計算し, 複素平面でプロットしている。

$$Z = I_w \cdot \exp\left[i\left\{\pm \cos^{-1}\left(\frac{I_x - I_m}{I_w}\right) - \phi\right\}\right] \quad (2)$$

ただし、

$$I_w = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{2} \quad (3)$$

$$I_m = \frac{(I_{\max} + I_{\min})}{2}$$

であり、 $I_w(x,y)$ はモジュレーションである。式(2)の±は \cos^{-1} 演算で不明な符号が両符号を取る可能性を考慮して導入している。 $Z(x,y)$ はある1時点(位相 $\phi(x,y)$ を持つ)から着目時点までの位相の変化量を偏角($\arg Z(x,y)$)として持つ複素数を必ず含んでおり、原点からの距離はその画素のモジュレーション $I_w(x,y)$ を表す。ここで符号が正しく、その結果、偏角が位相変化量を正しく与える確率は50%だが、正しい場合、偏角は測定点を中心とする小さな 3×3 の画素範囲ではほぼ同じ値となる。その結果、正しい変化量を与える偏角ではプロット点の密度が増す。一方、符号の誤ったものはスペックル位相のランダム性が強く影響し広く分散する。故に最終的に図3のすべての点を平均すると、平均値の偏角 $\arg Z$ は正しい位相の変化量 $\Delta\psi$ を示すことになる*。ここで式(2)の I_w はモジュレーションの大きな点により高精度な変化量を与えることを考慮して導入した(I_w が小さく大きい誤差を含む可能性のあるデータは平均での寄与が小さくなる)。

この方法で各画面、各画素での位相変化量がすべて計算できるので、画面内の特定位置、点S(計算の便宜上導入している)に対する相対位相値 $\theta(\theta(x,y) = \Delta\psi(x,y) - \Delta\psi(s))$ を画面内のすべての点で計算し、それらを $j=C1$ から $C5$ まで周期 2π にわたり平均する。この値は時間を掛けて取り込んだ多数枚画像の平均であるため、空気じょう乱の影響が抑えられたものになる。ここで周期 2π の平均としたのは、特定域(例えばC1からC2まで)だけの平均では、画像の光強度が平均強度 $I_m(x,y)$ より全般に大きかったり小さかったりして光電変換素子の非線形性が影響する可能性を持つからである。ところで、周期 2π にわたる間の平均には次の式を用いた。

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta\psi=0}^{\Delta\psi=2\pi} \theta \cdot d\Delta\psi \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{j=C1}^{j=C5} \theta \cdot \frac{d\Delta\psi}{dj} dj$$

なぜなら、図2のP1が j に対して示す強度変化は正確な正弦波形でなく、画像取り込みに際し $\Delta\psi$ の変化は一定でないと考えられるからである。式(4)の値は点Sに対する相対値であり、式(2)からも分かるように位相 $\phi(x,y)$ に対する変化量で、C1からC5までの平均でもある。故に、この相対値は点C1で求めた位相 $\phi(x,y)$ が、C1からC5までの画像で得られる位相値に比べ違っていた量を表す。故に最終的にこの相対値 $\theta(x,y)$ を $\phi(x,y)$ に加えてこれを高精度な位相とした。点Sの位相はゼロのままとなる。そのことから、Sは変形測定において変形量が比較されるべき基準点となる。

2.2.2 その他の補正方法

(1) モジュレーション $I_w(x,y)$ の計算値による、低モジュレーション画素の周辺データでの置き換え

スペックル干渉画像の特徴は、モジュレーション I_w が画素ごとに大きく違うことである。そして画素によっては I_w は非常に小さく、結果的にA/Dの分解能や電子的な雑音が大きく影響する。これを避けるには、周辺の I_w が大きなデータでこの点のデータを置

*文献8)で符号の誤ったものは $0 \sim 2\pi$ に広く分布することが示されている。符号の正しいもの、誤ったものすべての平均は、その結果、正しい変化量に対応する偏角の周辺に強く分布する。正しい偏角からのずれは少なからず存在するが、ここでは、以降、多数枚の画像にわたるデータを統計平均するため、結果として正しい偏角からのずれはあまり問題とならない。

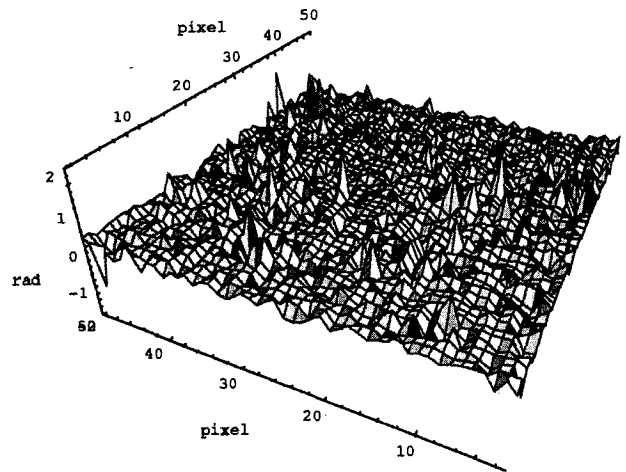


Fig.4 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated without any processing. The standard deviation is 0.21 rad

き換えれば良い。ここでは画素ごとの I_w が式(3)の計算で分かっているため、これを用いて置き換えた。置き換えには測定点を含む 3×3 の範囲で I_w が最大のものを用いた。

(2) メディアンフィルタによる計測値の置き換え

汎用的な画像処理手法の一つにメディアンフィルタ(測定点を含む周辺の複数データから n 番目に大きなデータを取り出し、測定点のデータとするフィルタ)があり、高速化され、かつ使いやすいものが広く普及している。これも用いて、上記の方法との比較ならびに併用の効果を調べた。ここでのメディアンフィルタの範囲も測定点を含む 3×3 の範囲とし、メディアンは最大値から5番目を採ることとした。

3. 測定結果

ここではC1取り込み時の位相とC2取り込み時の位相の差をそれぞれの処理法で求め、その空間的な変動量から測定の精度を評価した。

3.1 上に述べた方法をすべて用いない場合

位相シフトに誤差がないものとしてC1,C2,C3,C4を用いて式(1)からC1取り込み時の位相を求め、次にC2,C3,C4,C5を用いてC2取り込み時の位相を求め、それらの差を計算したものを図4に示す。横軸は画素であり、凹凸は画素による違いである。変動の標準偏差は0.21radとなった。

3.2 それぞれの方法を単独で用いる場合

3.2.1 連続取り込み画像から位相を測定する方法

C1からC5まで約60枚の画像を用いて補正したのだが、図4に対し大きな改善は見られなかった(結果は図4とほとんど同じ)。これはスペックル画像の特徴であるモジュレーションの小さな画素が測定結果に大きく影響することなどから、連続取り込み手法のみではその影響を改善できないことを示す。変動の標準偏差は少し小さく0.19radとなった。

3.2.2 低モジュレーション画素の周辺データでの置き換え

モジュレーションが小さい測定点(全画素の約20%)を、その点を中心とする 3×3 の領域内で最大のモジュレーションを持つ点のデータで置き換え、その後、式(1)で計算した結果を図5に示す。図4と比較すると大きなスパイク状の凹凸が消え、変動値が画像内で安定し、一定値に近づいていることが分かる。このことはやはりスペックル画像で避けられないモジュレーションの小さな画素が測定結果に大きく雑音として影響していることを示す。変動の標準偏差は0.11radとなった。

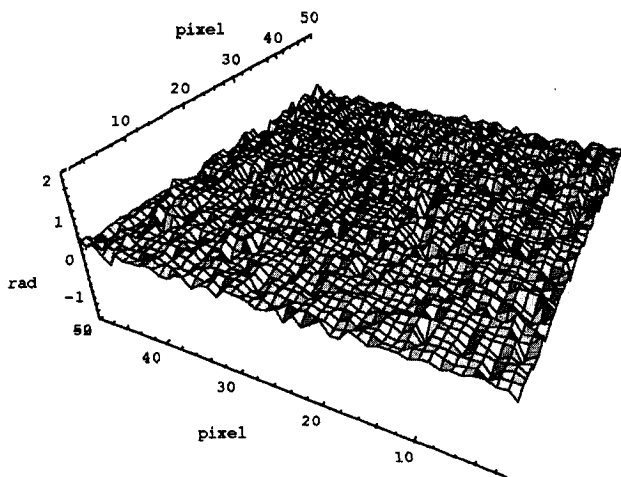


Fig.5 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated only with the data-replacing. The standard deviation is 0.11 rad

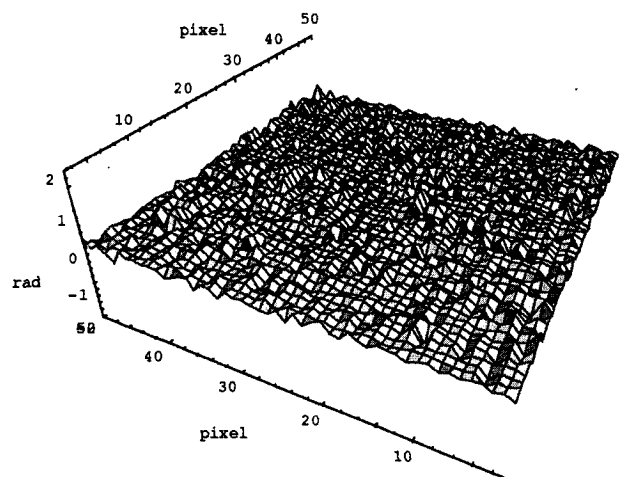


Fig.7 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated both with the proposed technique and with the data-replacing. The standard deviation is 0.092 rad

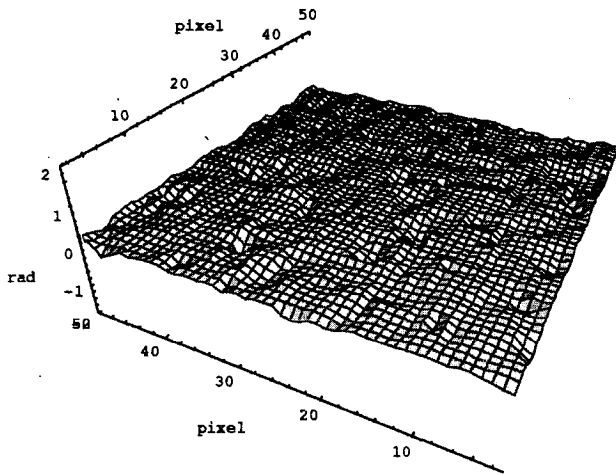


Fig.6 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated with the median filter. The standard deviation is 0.066 rad

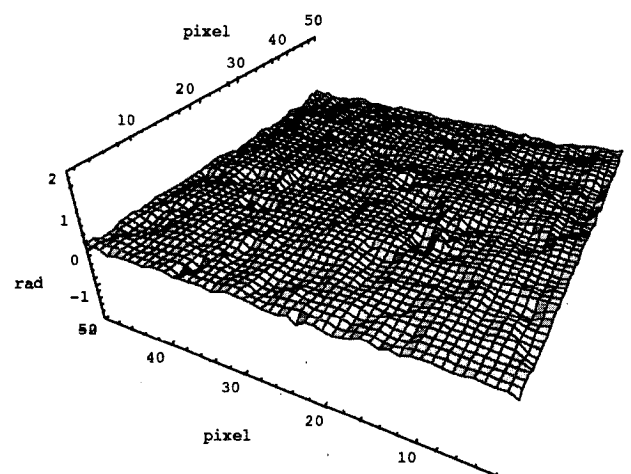


Fig.8 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated both with the data-replacing and with the median filter. The standard deviation is 0.065

3.2.3 メディアンフィルタによる計測値の置き換え

測定箇所を中心とする 3×3 の領域内で最大値から5番目を取り出すメディアンフィルタを図4の結果に施した結果を図6に示す。図5に比べてさらに小さな変動値となっている。図5での置き換えは測定画素のモジュレーションがあるしきい値を下回った場合のみの置き換えであったのに対し、ここでの置き換えは、測定箇所近傍すべての結果を使つての置き換えである。このために図5に比べて横方向の平均化が少し進む。しかし、変動値は大幅に小さく、標準偏差は0.066radとなった。

3.3 2方法を併用する場合

連続取り込み画像から位相を測定する方法と、低モジュレーション画素の周辺データでの置き換えを行う方法を併用した場合の測定結果を図7に示す。変動の標準偏差は0.092radとなった。次に低モジュレーション画素の周辺データでの置き換えを行う方法とメディアンフィルタによる計測値の置き換えを併用した場合の測定結果を図8に示す。変動の標準偏差は0.065radとなった。最後に、メディアンフィルタによる計測値の置き換えと連続取り込み画像から位相を測定する方法を併用した場合の測定結果を図9に示す。変動の標準偏差は0.045radとなった。

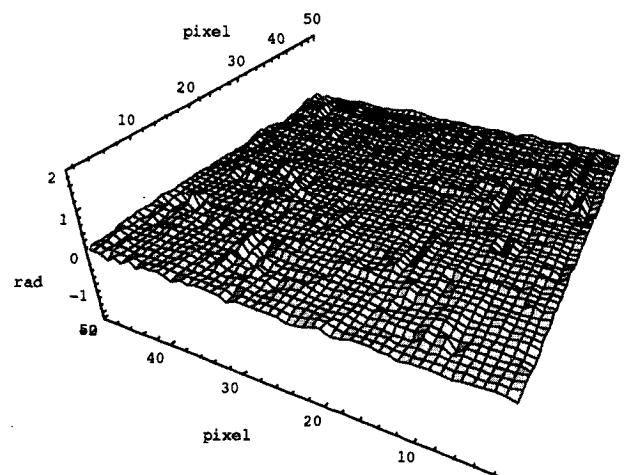


Fig.9 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated both with the proposed technique and with the median filter. The standard deviation is 0.045

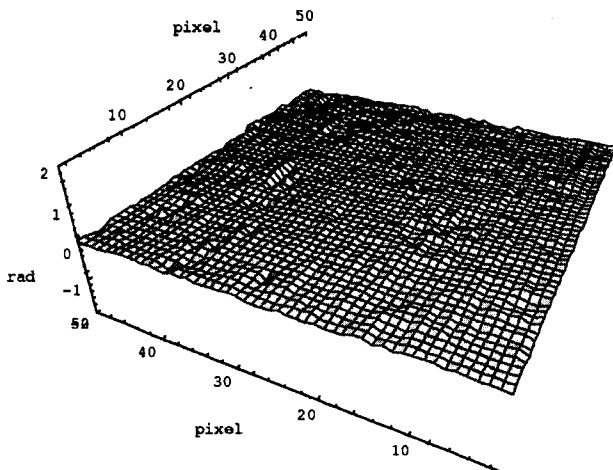


Fig.10 Phase difference between C1 image and C5 image. The phases are calculated with all the processing. The standard deviation is 0.034

3.4 すべてを併用する場合

3つの方法すべてを併用した結果を図10に示す。変動の標準偏差は0.034radであり、図8の、連続取り込み画像から位相を測定する方法を除いた場合の標準偏差0.065radに比べて変動値が約1/2に小さくなっている。これは図8に見られた浅い溝が連続取り込み法の併用で消えたことによる。すなわち、連続取り込み画像から高精度に位相を測定する方法は、メディアンフィルタによる処理や低モジュレーション画素の周辺データでの置き換えと併用でき、これまでのフィルタ処理で変動を低減化した後の、さらなる低減化に大きく寄与する方法であることが分かる。

4. 変形測定への応用

すべてを併用する方法を実際の変形測定に用いた結果を図11に示す。変形測定では、図1の装置でカメラの視野を上下のアルミニウム板の境界に移動し画像を100枚取り込んだ後に、粗面の下半分を裏から圧電素子で少し押し、その状態でさらに100枚取り込み、すべての処理方法を併用して2つの位相データを求め変形量を計算した。縦軸の単位はnmである。図12に、低モジュレーション画素の置き換えとメディアンフィルタのみで処理した結果を示す。図11と12を比べると、連続取り込みを含めると変動値は改善されるが、横方向の平均化はほとんど進んでいないことが分かる。すなわち、連続取り込み画像から位相を測定する方法は、メディアンフィルタによる処理や低モジュレーション画素の周辺データでの置き換えと併用でき、かつ横方向の平均化をあまり進めないまま変動の低減化を行うのに効果を持つ方法である。

5. ま と め

連続取り込みスペックル画像から位相を測定する方法を中心に、高精度位相測定法について調べ、次のことが分かった。

- (1) スペックル画像では、モジュレーション強度によるデータ置き換えで、大きなスパイク状の雑音信号を効果的に除去できる。
- (2) 連続取り込みを用いる方法は、単独ではあまり効果はないが、(1)のデータ置き換えやメディアンフィルタと併用すると、その効果は大きい。すべてを併用する時、変動の標準偏差は0.034rad (図10)であった。また、連続取り込みを用いる方法を除いた時の標準偏差は0.065rad (図8)であった。

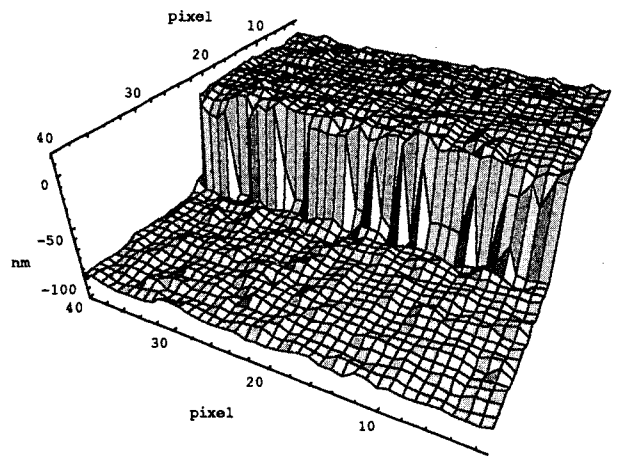


Fig.11 Result of deformation measurement calculated with all the method

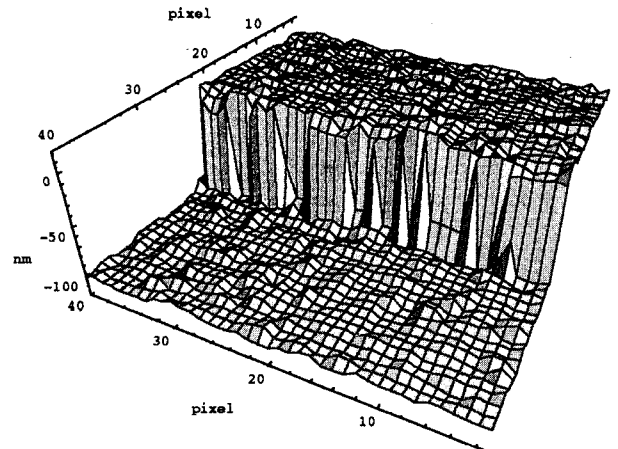


Fig.12 Result of deformation measurement calculated without the proposed method

参 考 文 献

- 1) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 稲部勝幸: 半導体レーザを用いた段差を持つ粗面の形状計測 -3波長での位相測定を用いる方法-, 精密工学会誌, 65, 3 (1999) 418.
- 2) J. Schwider: Phaseshifting Interferometry: Reference Phase Error Reduction, Appl. Opt., 28, 18, (1989) 3889.
- 3) B. Zhao and Y. Surrel: Phase Shifting: Six-sample Self-calibrating Algorithm Insensitive to the Second Harmonic in the Fringe Signal, Opt. Eng., 34, 9, (1995) 2821.
- 4) C. Joenathan: Phase-measuring Interferometry; New Methods and Error Analysis, Appl. Opt., 33, 19, (1994) 4147.
- 5) J. Schmit and K. Creath: Extended Averaging Technique for Derivation of Error-compensating Algorithms in Phase-shifting Interferometry, Appl. Opt., 34, 19, (1995) 3610.
- 6) H.Kadono and S.Toyooka: Statistical Interferometry Based on the Statistics of Speckle Phase, Opt. Lett., 16, 12, (1991) 883.
- 7) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 稲部勝幸: ESPIでの4画面位相シフト法におけるランダムなシフト誤差補正法, 精密工学会誌, 64, 10 (1998) 1507.
- 8) M.Adachi, Y.Ueyama and K.Inabe: Automatic Deformation Analysis in Electronic Speckle Pattern Interferometry Using One Speckle Interferogram of Deformed Object, Opt. Rev., 4, 3, (1997) 429.