

障害物による位相不連続をもつ縞画像の空間的二次元自動解析

新井 泰彦*・横関 俊介**・山田 朝治*

*関西大学工学部機械工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

**九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820 飯塚市大字川津 680-4

Automatic Spatial Fringe Analysis Method for Two Dimensional Fringe Image Including Phase Discontinuities by Obstructions

Yasuhiko ARAI,* Shunsuke YOKOZEKI** and Tomoharu YAMADA*

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita 564

**Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and System Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Kawazu, Iizuka 820

A new 2-D automatic spatial fringe analysis method for analyzing a fringe image including the image of an obstruction, such as a blade in an interferogram of pressure distribution around turbine blades, is proposed. In the analysis, first, the image of the obstruction is removed from the fringe image using the characteristics of spatial fringe analysis method. Next, the problem with respect to the phase discontinuities of the principal values of inverse-trigonometric function is solved. Then, the processing paths for the automatic phase unwrapping processing are found out using the conception of the directed graph. Finally, the automatic 2-D spatial fringe analysis can be realized with the calculation along the processing paths. The experimental results show that the 2-D fringe analysis for the image with obstructions can be performed accurately and automatically by the method proposed. In addition to the experiment, a processing for an image with noise is discussed using the simulation by the proposed method. The simulation shows that this method is successful for the processing of the image with noise.

1. はじめに

Fig. 1 に示すようなタービン翼まわりなどの流れの解析手段として干渉縞解析が古くから用いられている^{1,2)}。一方、ダイナミックに変化する現象を解析する手段として、1枚の画像で処理することができる空間的縞解析法も利用されるに至っている³⁾。しかしながらいずれにしても、Fig. 1 に示すような干渉縞画像は翼などの複雑な形状をもつ物体の像を含むため、従来行われている自動縞解析法に基づく処理法⁴⁾では、物体の像による画像の欠落によって、処理が困難になっている。すなわち、 \tan^{-1} 関数に基づき位相を求める場合には、 2π rad の位相飛び⁵⁾が縞解析の根本的問題として発生し、また、この問題は、ノイズの問題^{6,7)}と相まって phase unwrapping を煩雑な処理⁸⁾としている。さらに、本報で示すように画像内に障害物が存在すると、従来の問題

以上に、位相検出ならびに phase unwrapping は難しい問題となってくる。

しかしながら、前報で報告した手法⁹⁾は、 2π rad の位相飛びの問題を二次元処理においても容易に回避できることが確認されているので、上記の問題解決の手がかりとなると考えられる。そこで、本報では画像内部の障害物の分離を行い、さらに、前報⁹⁾の考え方に従って 2π rad の位相飛びの問題を解消し、加えて、画像に対して、有向グラフ¹⁰⁾の考え方を導入することによって、Fig. 1 に示すような複雑な形状の障害物をもつ干渉縞の自動解析を行うことができる空間的縞解析法を提案している。

原理確認実験では、提案した手法を複数の複雑な障害物が存在する連続した位相分布をもつ干渉縞に適用することによって、その原理ならびに処理における問題点の



Fig. 1. Interferogram of pressure distribution around turbine blades.

検討を行い、さらに、ノイズを含む縞画像解析へと適用し、その有効性を検討している。

2. 演算領域の決定

本研究では、画像内部に障害物が存在する場合、スムーズに演算を行うためには、位相演算領域と非演算領域との分離を行うことが、処理の簡素化につながるものと考え、空間的縞解析法独特の性質¹¹⁾を利用した手法によって演算領域の分離を行っている。

本報では、空間的縞解析における縞画像の基本的性質⁹⁾を用いて、 π rad シフトされた2枚のモアレ縞画像間の加算を行うことによってモアレ縞のバイアス成分のみを抽出し、このバイアス成分のみの画像から障害物を除去した領域つまり演算領域の抽出を行っている。

Fig. 2 (前報同様の座標系を用いることにする) に示す障害物を含む変形キャリアー縞画像に対して、0相、 π 相2種類のモアレ縞画像を直線補間に基づく処理¹²⁾によって求めたものがFig. 3である。この2枚の画像間で加算を行った結果がFig. 4(A)である。画像の縞情報は、キャンセルされバイアス成分のみが抽出されていることがわかる。この画像では、障害物はバイアス成分よりも明らかに輝度が低く、一般に行われているような二値化処理¹³⁾によって容易にFig. 4(B)に示すように障害物を分離し、演算領域を決定することができる。

3. 位相飛びを回避した二次元空間的縞解析⁹⁾

前報⁹⁾に示した二次元空間的縞解析法では、1枚の変形を受けたキャリアー縞より位相の異なった4枚のモアレ縞画像を得ることができる。このモアレ縞画像を用いると、 \tan^{-1} 関数によって縞の位相を求めることができ

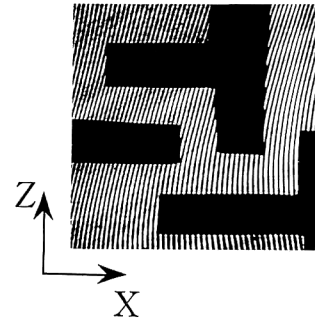


Fig. 2. Deformed carrier fringes including obstructions.

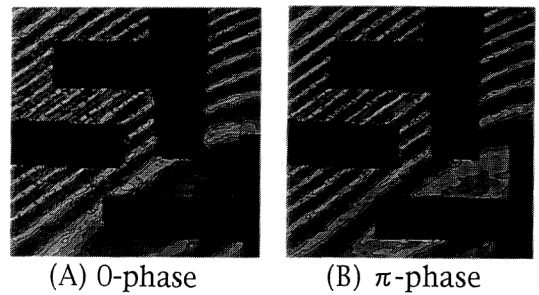


Fig. 3. Images of moire fringes by linear interpolation method.

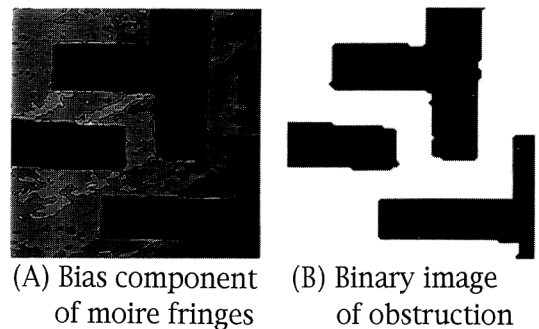


Fig. 4. Extraction of obstruction from interferogram.

る。このとき、位相が π rad異なる結果を得るために、もう一つの \tan^{-1} 関数を設定し、 π rad異なったモアレ縞画像に対しての位相分布をそれぞれ求める。次に、2つの \tan^{-1} 関数より求めた x 、 z 各方向に対する位相の変化率から、 \tan^{-1} 関数の 2π radの位相飛びの影響を両者の相対的關係を用いることによって除去することができる。この位相の変化率に対して二次元的に積分経路を決定し、その経路に沿って積分を行えば、二次元位相分布を容易に復元することができる⁹⁾。

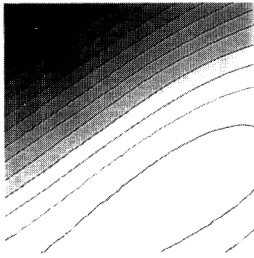


Fig. 5. Unwrapped phase map of slide-glass.

前報⁹⁾では、画像処理時に障害物は存在していなかったため、積分経路を自由に設定することによってスライドガラスの測定では、Fig. 5 に示すような位相の復元を行うことができた。この考え方に従うと、たとえ画像内に障害物が存在しても、障害物を回避しながら積分経路を決定することができれば、複雑な障害物を含む縞画像においても、位相の復元は可能であると考えられる。この考え方を実現するために、本報では、積分経路の設定を有向グラフの考え方¹⁰⁾に基づく処理法を用いている。

4. 有向グラフの考え方に基づく積分経路の決定

本報で用いた積分経路の設定法は、経路を探索するために用いられるきわめて簡単な演算に基づく手法である。

以下に積分経路の探索、ならびに位相分布検出手順について述べる。

(1) まず始めに、画像の欠落部分（障害物）を回避するために、あらかじめ欠落部分の位置情報を検索し、その分布情報を明確な地図としてとらえておく。具体的には、2章に示す処理によって、Fig. 4(B)に示すような障害物の領域（黒い部分）を計算機内部に設定しておく。この処理によって、欠落部分と位相演算領域とを分離する。

(2) 縞画像の位相演算領域において、前報の手法⁹⁾に従って4枚のモアレ縞画像 (Fig. 6), 位相分布 (Fig. 7), さらに各方向に対する位相の変化率 (Fig. 8) を求める。

(3) 積分経路の始点を設定するため、Fig. 4(B)に示す画像における位相演算領域の任意の1点を抽出し、求める位相の初期値として0を与える。

(4) 経路設定時には、処理の高速化を目的に、また位相の変化量の質は不良部に対しては後処理がなされることを考慮してほぼ一定であると考え、あらかじめ定義した上下左右の4方向に対する経路の進行方向の優先順位

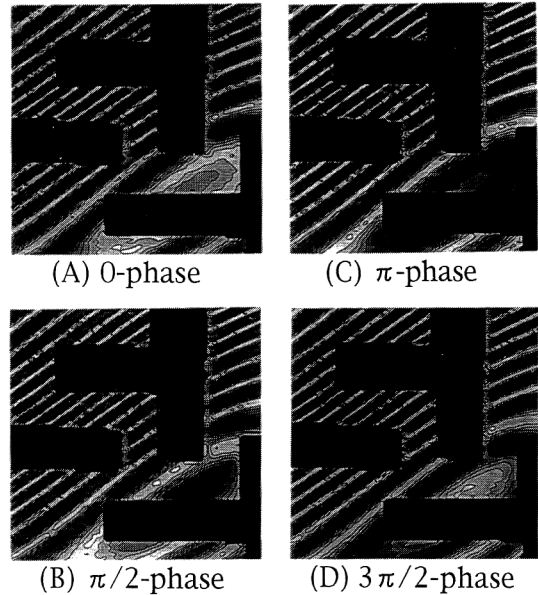


Fig. 6. Images of moire fringes.

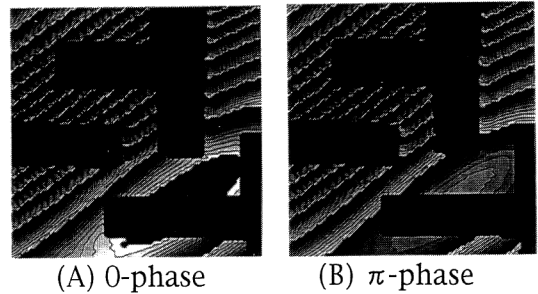


Fig. 7. Wrapped phase maps of moire fringes.

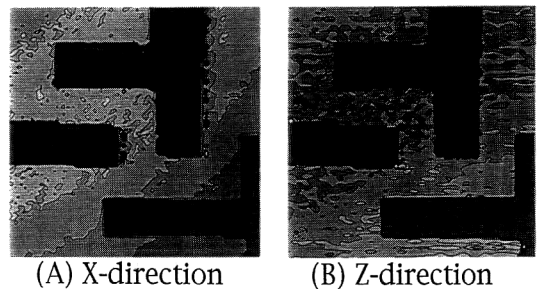


Fig. 8. Derivative maps of phase of moire fringes.

(ここでは、各節点に対して右、上、左、下の順に次の節点への進行に対する重み付け¹⁴⁾として優先順位を与えている)に従って、障害物を回避する経路を求める。ただし、通過した点は記憶し、重複して探索しない。

(5) (4)に示す手法によって求めた経路に従ってあら

かじめ求めている各点における位相の x, z 方向それぞれの変化量を積分して位相分布を求める。

(4) 4 方向いずれにも積分経路が袋小路に入ったような状態で、これ以上経路の拡張ができなくなった場合には、新たな経路 (branch) を探索するために再度始点を求める作業に入る。本研究では、連続した位相分布をもつ干渉縞を対象としているので、求めようとしている画像全域の位相分布が分断されないようにするために、新たに求める始点としては、すでに積分を行い位相が求められた点に隣接する任意の点を設定している。このとき、初期値としては、その隣接点との経路に沿った積分値を用いている。以上 (4), (5), (6) の処理を順次繰り返して、画像演算領域全域の点に対する経路が tree の構造になるように結んでいる。

(7) 障害物以外の画像全域の測定点をすべて処理したか否かを確認し作業を終了する。

5. 実験結果

原理の確認を行うために、前報⁹⁾同様のシステムを用いて、Fig. 5 に示す位相分布をもつスライドガラスを被測定対象とした実験を行った。実験では、厚さ 1 mm の黒色に塗布したアルミ板によって作られたマスクをスライドガラス前面に設置することによって、障害物モデルを構成した。したがって、マスクを除去することによって、障害物のない画像も容易に得ることができる測定対象が用いられている。

まず、3 章に示す手法に従って位相の x 方向と z 方向の変化量を求めることができるので、4 章に示す手法によってデータの欠落部分 (障害物) を回避しながら積分を行い位相分布を求めた。

このように欠落部分を回避しつつ積分を行った結果得られた phase map が Fig. 9(A) である。本手法に基づく処理では、障害物が存在する画像においても二次元位相分布の検出が可能であることがわかる。本実験では、

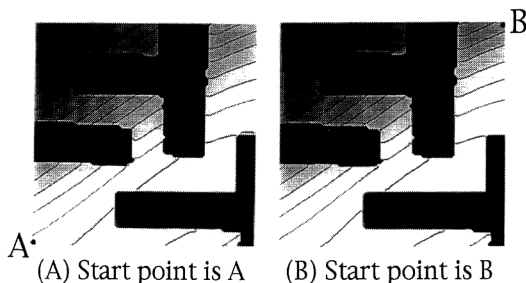


Fig. 9. Unwrapped phase maps.

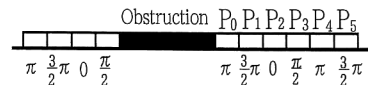
PowerMac 8100/80 AV を用いて Fig. 4(B) に示す程度の障害物をもつ 512×512 画素の画像に対して、トータル処理時間として 60 秒を要し、そのうち積分路検索に 35 秒を要している。

Fig. 9(A) は処理の始点として画像の左下 A 点を設定しているのに対して Fig. 9(B) は処理の始点を右上 B 点に移した場合の結果であり、異なる経路に基づいて処理が行われた場合の結果である。積分経路の始点が異なる Fig. 9(A) と Fig. 9(B) との差の標準偏差は 1.1×10^{-4} rad である。この結果より両者はほぼ同一であると考えられ、経路が異なる場合でも本手法では結果に大きく影響しないことがわかる。一方、マスクを取り除き欠落のない場合の処理結果である Fig. 5 と欠落のある Fig. 9(A) との位相演算領域における差の標準偏差は 2.9×10^{-1} rad である。この場合、障害物近傍で誤差が生じていることがわかった。この問題は、本手法独特の 1 枚の変形キャリアー縞から直接スプライン補間によって 4 枚の位相の異なるモアレ縞画像を求める処理時に、欠落部分の境界部分で情報が十分でなくなるために二次元スプライン補間処理ができなくなることに起因しているものであり、また、障害物のエッジ部の回折現象によって生じる問題でもある。

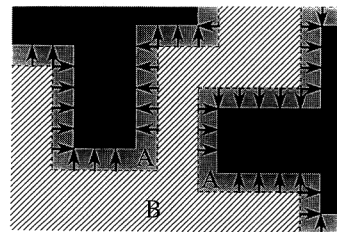
この問題に対して、本研究では 2 つの対策を講じた。

(1) 二次元スプライン補間による処理が不可能な障害物近傍 A 領域 (Fig. 10(B)) に対しては、一次元処理 (外挿法も含めて) によって 4 枚のモアレ縞画像輝度分布を求め、その結果を用いて位相を求める。

前報に示したように本手法では、1 枚の画像から 4 枚のモアレ縞画像を抽出し位相を求めている。したがって、走査線 4 本がキャリアー縞 1 周期に対応していると



(A) Information on pixel of TV camera around obstruction



(B) Integrating path around obstruction

Fig. 10. Local image processing around obstructions.

すると、Fig. 10(A)に示すように障害物近傍では、次の問題が発生する。

障害物のエッジが走査線に垂直方向に存在する場合、 P_0 点が π 相のモアレ縞に対するデータ点であるとする、 π 相のモアレ縞に関しては、 P_0 と P_4 点のデータを用いて P_1, P_2, P_3 点においても内挿演算によってその分布を推定することができる。しかし、 P_0 点では、 $3\pi/2, 0, \pi/2$ 相に対するモアレ縞分布は内挿法に基づく演算では推定できない。すなわち、 P_0 点で $3\pi/2$ 相のモアレ縞分布を推定するためには、 P_1 と P_5 点でのデータに基づく外挿が必要になる。一方、障害物のエッジが走査線に平行に存在する場合（例えば、図では水平方向）には、一次元補間処理¹²⁾を用いてモアレ縞輝度分布を求めている。

(2) 一次元処理によって位相を求めたA領域に対して、B領域とはphase unwrapping処理を別個に行う。

A領域に対してのphase unwrapping処理では、Fig. 10(B)に示すようにスプライン補間処理によって求めたB領域とは別個に経路追跡を行っている。A領域は、一次元処理（外挿を含む）がなされているので、測定精度はB領域に比べて十分には期待できない。そこで、A領域の測定精度の不足がスプライン補間によるB領域へと伝搬しないように、A、Bそれぞれの領域を分離し、測定結果全域の測定精度の低下を防ぐ処理を行った。すなわち、phase unwrappingの経路決定に際して、tree構造の末端にA領域処理のpathが存在するように、B領域から障害物に向かって矢印に示す経路に沿って、A領域の位相を求める処理がなされている。

以上の処理を行ったものの、境界部における処理については今後十分検討の余地（外挿法導入の是非また、回折の影響も含めて）があると考えられる。また、上記の構造をもつtreeに従った処理を行っているため、状況に合わせた処理が可能になっている反面、積分経路分岐のための始点を求める処理を繰り返し行う必要が発生している。この結果として、演算時間増大の問題が生じている。

しかしながら、本報に示した手法により、複雑な障害物が存在する干渉縞画像においても、縞の自動解析が容易に行えることが確認できた。

6. ノイズを含む画像への適用

一般に、画像にノイズが存在すると、phase unwrappingには難しい問題が生じることが知られている¹⁵⁾。しかし、本研究では、従来議論されているような処

理^{7,16)}ではなく、前章までに示したと同様の障害物に対する考え方に基づいて、以下に示すようにノイズによる画像内の問題を取り扱った。

前章までの障害物とは、画像内に縞情報が存在しない領域を意味していた。ところが、ノイズの影響では、縞情報にノイズが重畳する現象を対象としなければならない。そのために、位相の異なったモアレ縞の重ね合わせだけでは、この種の障害物情報を抽出することはできない。そこで、以下に示す考え方に従って、ノイズにより発生した新たな障害物を抽出し、phase unwrappingを行った。

本研究に示すphase unwrappingでは、位相が π rad異なる2種類の \tan^{-1} 関数を用いた処理によって、逆三角関数の主値にともなう 2π radの位相飛びはすべて除去されている。したがって、縦、横それぞれの位相の1 pixelあたりの変化量は、ノイズが存在しない場合には、被測定物体の位相変化のみとなっているはずである。ところがノイズが含まれると、モアレ縞検出過程で、スプライン補間の平滑作用の影響によっていくぶんノイズは軽減されると考えられるものの、 \tan^{-1} 関数を用いた位相変化量分布の検出結果には、逆三角関数の主値にともなう位相飛びにも匹敵するような大きな位相の変化が1 pixel内でも発生する。ところが、前述のように、本研究における位相の変化量は、本来、被測定物体の位相変化のみであると考えられるので、ノイズの影響により大きな位相変化が検出されたpixelは、S/N比の低い情報に基づく演算が行われているにすぎないと考えられる。さらに、本研究では、8 pixelを1周期としたキャリア縞を用いた処理が行われていることを考えると、サンプリングの定理から、16 pixelが1周期となる周波数をもつ信号以上の周波数は本質的に検出できないと考えられるので、1 pixel内における位相の変化量は、最大 ± 0.393 rad/pixel ($=2\pi/16$) 以上にはならないと考えられる。そこで、縦、横の位相の変化量分布に対して、このような考え方に基づく閾値 (THV: threshold value) を用いて処理を行えば、ノイズによ

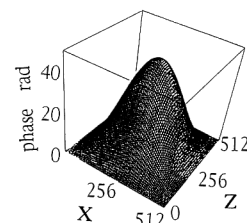


Fig. 11. Noise-free phase map.

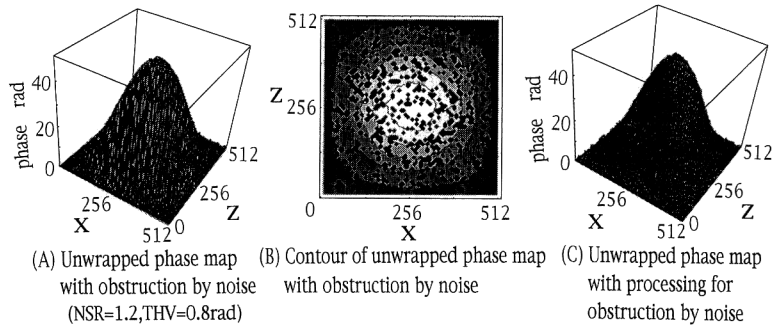


Fig. 12. Unwrapped phase maps for image with noise (NSR=1.2).

る影響として本来存在し得ない変化量をもつ pixel を抽出することができるはずである。この考え方に基づくと、ノイズによる phase unwrapping に対する新たな障害物を定義することができる。

以上の考え方にに基づき、武田が示したと同様のシミュレーション¹⁷⁾を行った。シミュレーションでは、位相の変化量に対する閾値をノイズマージンを考慮して、 $THV = \pm 0.8 \text{ rad}$ として行うことにした。

Fig. 11 に示す位相分布モデルに対して、NSR (noise-to-signal ratio) = 1.2 で位相分布を求めた結果が Fig. 12(A) である。

Fig. 12(A) に示す位相分布の三次元表示では、S/N 比の低い pixel において演算結果の欠落（障害物として phase unwrapping 処理において回避されている）はあるものの、被測定物体全体としての位相分布は、なんら問題もなく障害物を回避しつつ、位相つなぎされていることがわかる。また、Fig. 12(B) は、この場合の位相の等高線図である。多数のノイズによる障害物（図中の黒点）が確認できる。次に、ノイズによる障害物によって回避された領域に対して、前章に示した Fig. 10 の A 領域に対する処理と同様に、別個に位相を隣接する pixel からの新たな branch（ただし、変化量のもっとも小さい隣接する pixel との間で新たな branch を設定する）として求める処理を行ったものが、Fig. 12(C) である。NSR=1.2 に対する画像においても容易に phase unwrapping が実現され、測定領域全域で位相分布が求められていることがわかる。この場合のモデルとしての Fig. 11 と Fig. 12(C) との差の標準偏差は、 0.647 rad （約 10 分の 1 フリンジ）であることが確認されている。

武田によって示された誤差が急激に増加する領域内の値として NSR=2.0 とした場合についての結果を Fig. 13 に示す。ノイズにより新たに発生した障害物が全 pixel 数の 40% を超えてしまい、位相がつながらなく

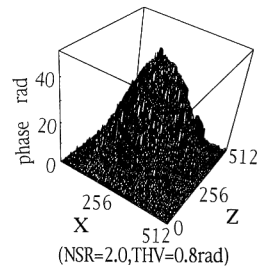


Fig. 13. Unwrapped phase map for image with noise (NSR=2.0).

なっていることが確認できる。また、この場合の処理時間は、30 分を超えている。

以上のように、シミュレーションでは、 $THV = \pm 0.8 \text{ rad}$ が設定されていたが、THV が小さくなると誤差の伝搬は小さくなる反面、障害物の数が多くなり、処理時間が增大するとともに NSR=2.0 の場合に示されたような新たな問題が生じる。一方、大きくなると、処理時間が減少するものの、誤差の伝搬が大きくなる問題がある。これらの問題についての議論が今後必要であると考えられる。

7. おわりに

本研究では以下に示す結果を得た。

(1) 空間的編解析法特有の性質を利用することによって、画像内の障害物を抽出することのできる手法を示した。

(2) 前報に示した \tan^{-1} 関数の演算時に発生する $2\pi \text{ rad}$ の位相飛びの問題を解消することのできる手法に、経路探索技術を用いた手法を導入することによって、干渉編画像にデータの欠落が存在する複雑な編画像に対しても phase unwrapping が可能な二次元編自動解析法を示した。

(3) 原理確認実験において、本手法によって二次元縞自動解析が可能であることを示した。

(4) 画像がノイズを含む場合にも、ノイズに対する障害物を定義することによって、phase unwrappingが可能であることを示した。

文 献

- 1) 浅沼 強：新版 流れの可視化ハンドブック（朝倉書店，東京，1986）pp. 291-439.
- 2) W. Bleakney, D. R. White and W. C. Griffith: "Measurements of diffraction of shock waves and resulting loading of structures," J. Appl. Mech., **DEC** (1950) 439-446.
- 3) M. Kujawinska: "Spatial phase measurement methods," *Interferogram Analysis*, eds. D. W. Robinson and G. T. Reid (Inst. of Phys. Publ., Bristol, 1993) pp. 94-140.
- 4) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 5) K. Itoh: "Analysis of the phase unwrapping algorithm," Appl. Opt., **21** (1982) 2470.
- 6) D. J. Bone: "Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem," Appl. Opt., **30** (1991) 3627-3632.
- 7) J. M. Huntley and H. Saldner: "Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis," Appl. Opt., **32** (1993) 3047-3052.
- 8) J. E. Greivenkamp: "Sub-nyquist interferometry," Appl. Opt., **26** (1987) 5245-5258.
- 9) 新井泰彦, 横関俊介, 白木万博, 山田朝治: "CCD 画像のサンプリング技術を用いた二次元空間的縞解析法", 光学, **25** (1996) 42-47.
- 10) 伊理正夫, 古林 隆: ネットワーク理論 (日科技連, 東京, 1995) pp. 1-17.
- 11) Y. Arai and K. Kurata: "Binarization of scanning moire fringe pattern," Opt. Lasers Eng., **8** (1988) 263-275.
- 12) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "サンプリング技術を用いた CCD 画像の空間的縞解析法の改善", 光学, **24** (1995) 581-586.
- 13) A. Rosenfeld: *Digital Picture Processing* (Academic Press, New York, 1976) pp. 258-275.
- 14) P. E. Hart, N. J. Nilsson and B. Raphael: "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths," IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern., **ssc-4** (1968) 100-107.
- 15) J. M. Huntley: "Noise-immune phase unwrapping algorithm," Appl. Opt., **28** (1989) 3268-3270.
- 16) L. D. Barr, V. Coude du Foresto, J. Fox, G. A. Poculp, J. Richardoson, C. Roddier and F. Roddier: "Large-mirror testing facility at the National Optical Astronomy Observatories," Opt. Eng., **30** (1991) 1405-1414.
- 17) M. Takeda and T. Abe: "Phase unwrapping by a maximum cross-amplitude spanning tree algorithm: a comparative study," Opt. Eng., **35** (1996) 2345-2351.