

バーチャルスペックルパターンを用いた高分解能ダイナミック面内変形計測

新井 泰彦*・島村 遼一*・横関 俊介**

* 関西大学システム理工学部機械工学科 〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35

** 常光応用光学研究所 〒811-4142 宗像市泉が丘 2-32-1

A Dynamic and High Resolution In-Plane Deformation Measurement Using Virtual Speckle Patterns

Yasuhiko ARAI*, Ryouichi SHIMAMURA* and Shunsuke YOKOZEKI**

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Science, Kansai University,
3-3-35 Yamate-cho, Suita 564-8680

** Jyoko Applied Optics Laboratory, 2-32-1 Izumigaoka, Munakata 811-4142

The deformation measurement method based on the virtual speckle patterns has been reported. The method can analyze the phase map in high resolution by using only information concerning the change of intensity of each speckle during a deformation process. In this paper, a dynamic in-plane deformation measurement by this method is investigated. In experiments, the phenomenon of the collision of a metal sphere to a hard rubber block is measured. It is confirmed that this method can measure a large deformation which can not be measured by the ordinary methods and that the high resolution dynamic in-plane deformation measurement can be also performed by this method.

Key words: ESPI, dynamic measurement, in-plane deformation, virtual speckle pattern, high resolution

1. はじめに

スペックル干渉計測法¹⁻⁴⁾は、粗面をもつ物体に対する有効な変形計測法である。その変形解析では、変形前後のスペックルパターンが採取され、これらのスペックルパターン間の強度分布の差を二乗演算（あるいは絶対値演算）することによりスペックルグラムを求め、変形を縞画像としてとらえ、変形量が算出されている^{5,6)}。

このようなスペックル干渉計測法をはじめとする光波干渉計測技術は、1960年代より、振動解析⁷⁾などの分野で二次元非接触動的計測法として利用されてきている。さらに、電子技術の発達に伴いTVカメラを用いてスペックルパターンを採取する電子スペックル干渉法（electronic speckle pattern interferometry: ESPI）⁴⁾が利用されるに至っている。

1970年代には、縞走査技術の導入¹⁾により、その分解能は急速に向上し、その後、フーリエ変換を用いた縞解析

法⁸⁾など、さまざまな高分解能な解析手法が提案され利用されてきている。

この高分解能化を目指すための縞走査技術の導入に当たっては、参照光の位相を制御する時間的縞解析法^{5,6,9,10)}と参照光の波面を傾けることによって空間的な情報を与え、キャリヤー縞を発生させる空間的縞解析法^{9,11-13)}が用いられている。ところが、前者の縞解析技術では、少なくとも3枚の縞画像が必要となるために、動的に変形する測定対象の変形量を高分解能にとらえるためには、マルチカメラ技術¹⁴⁾を利用するなど、特殊な光学系が必要とされている。

一方、空間的縞解析技術では、変形量が小さい場合には、変形前にキャリヤー縞を発生させるためのスペックルパターンがあらかじめ採取され、その後に、変形前後の2枚のスペックルパターンを取得することによって、測定物体の変形解析が行われている¹¹⁻¹³⁾。しかしながら、変形

E-mail: arai@kansai-u.ac.jp

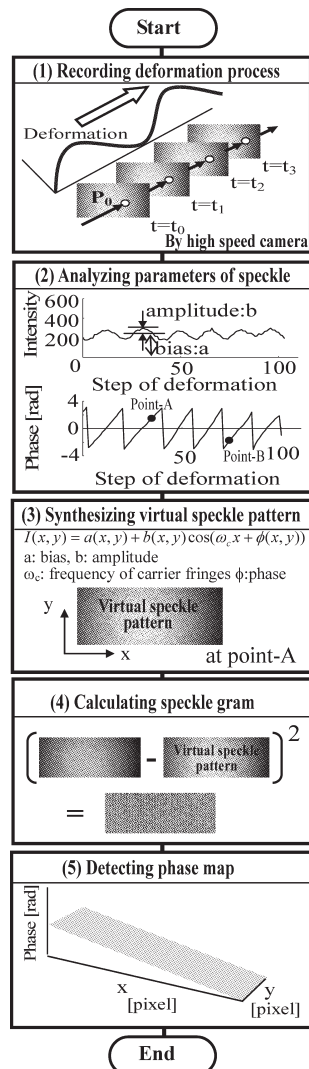


Fig. 1 Flow chart of fringe analysis using virtual speckle pattern.

量が大きくなるとスペックルパターン内のスペックルが、変形前後で空間的に重ならない問題が生じ、変形計測を行うことが困難になっている。

このような問題に対して、1990年代に入ると、時間的情報解析技術 (temporal analysis) を基礎とした新しい位相解析法^{15,16)}が提案されている。この手法では、フーリエ変換は従来の空間的な領域での利用のみならず、時間領域でも用いられ、さらに、時間的搬送波信号 (temporal carrier) の適用により、複雑に変形する大変形計測も取り扱えるように改善がはかられてきている¹⁷⁾。現在では、フーリエ変換のみならず、時間領域でのウェーブレット変換を用いた解析法が提案されるに至っている。しかしながら、その解析過程では、系統誤差の発生が議論されるなど、新たな問題が生じている¹⁸⁾。また、動的変形計測を実現するために、1枚の縞画像で変形計測を行う試みも報告

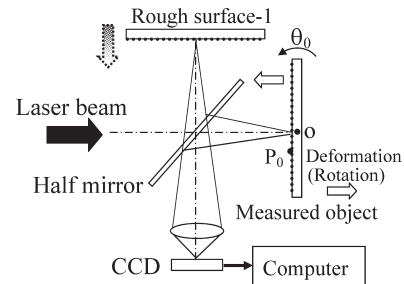


Fig. 2 Optical system for out-of-plane deformation measurement.

されている¹⁹⁻²⁴⁾。

本研究では、上記干渉計測法の発達過程、さらに、それぞれの解析法における問題点を踏まえることにより開発されたバーチャルスペックルパターンを用いる縞解析法²⁵⁻²⁷⁾を動的面内変形計測へ利用した場合の光学系、高速度カメラのあり方について検討している。

実験結果より、本報で提案する高速度カメラを用いたスペックル干渉計測法によって、大変形をいくつかの小さな変形に分割することで、従来法では解析できなかった動的大変形面内計測が、高分解能に実施可能であることを示している。

2. バーチャルスペックルパターンの作製²⁵⁻²⁷⁾

バーチャルスペックルパターンを用いた変形解析原理を、比較的容易に理解できる面外変形計測過程において、Fig. 1 に示すフローチャートを用いて説明する。

Fig. 2 に示す光学系において、測定対象が面外変形した (回転中心 O のまわりに回転した) 場合、測定対象上の点 P_0 におけるスペックルパターン内の強度は、微小変形であれば時間の経過とともに光路長が変化し、光源の波長の2分の1を周期とした正弦波状の強度分布をもつことになる²⁵⁾。

この変形に伴うスペックルの強度変化を Fig. 1 (1) に示すように、CCD の各ピクセルにおいてすべて記録する。次に、Fig. 1 (1) に示すこのスペックルの強度変化に対してヒルベルト変換²⁸⁻³²⁾を時間領域で行う。この処理により、Fig. 1 (2) に示すように、変形に伴うスペックルの位相成分、振幅成分、バイアス成分を各ピクセルにおいて求めることができる。すなわち、ヒルベルト変換により求めた cosine, sine 成分の比を逆正接関数に代入すると、Fig. 1 (2) に示すような各ピクセルにおける変形にもつづいた位相分布 $\phi(x, y)$ を求めることができる。また、各ピクセルにおける強度分布の振幅成分 $b(x, y)$ は、ヒルベルト変換により得られた強度変化の cosine, sine 成分を合成す

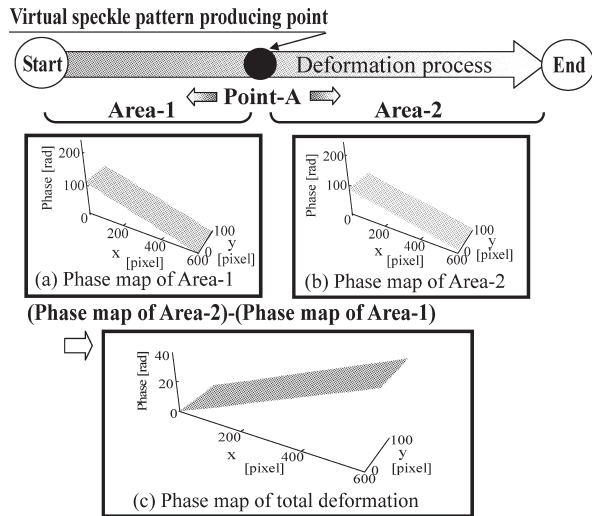


Fig. 3 Analyzing process for reducing error.

ることによって求めることができる。さらに、ヒルベルト変換時に用いるフーリエ変換結果の低周波数成分を利用すると、バイアス成分 $a(x, y)$ も抽出することができる²⁵⁾。

ここで、バーチャルスペックルパターンを作製する時刻 (Fig. 1 (2) では Point-A) において、このようにして求めたスペックルの位相成分、振幅成分、バイアス成分、さらに、式 (1) に示すように空間的にキャリア情報としての位相情報を与え、任意の時刻において二次元配列すると、変形過程の任意の時刻における空間キャリア情報をもった二次元強度分布を定義することができる。

すなわち、Fig. 1 (3) に示すような空間的キャリア情報をもったバーチャルスペックルパターンの強度分布 $I(x, y)$ は、式 (1) に示すように人工的に合成することができる。

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\{\omega_c x + \varphi(x, y)\} \quad (1)$$

ここで、 ω_c は空間キャリア周波数である。

Fig. 2 に示す光学系において、測定対象は回転中心 0 を境として上下ではその変形方向が異なっている。すなわち、矢印が示すように、変形に伴い回転中心の下部では位相が増加し、上部では減少している。実際には、このような変形方向判別をしなければならない。このような問題に対して本手法では、Fig. 2 の光学系において位相の基準を与えるために設置している粗面-1 を、圧電素子を用いて定速に平行移動させ、時間的搬送波信号を付与することによって解決している^{26,27)}。ただし、この移動速度は、現状では、測定対象の変形方向ならびに最大変形速度に応じて適宜状況に合わせて定められている。

本報に示すバーチャルスペックルパターンを用いた新しい手法²⁵⁻²⁷⁾ では、高分解能化をはかるために、さらなる工夫がなされている。すなわち、従来の時間的情報解析技術では、フーリエ変換演算に誤差要因があることが知られている。この問題を回避するために、本手法では、変形に伴い発生するスペックルの時間的強度変化から得られた位相分布結果を最終的な変形に関する位相解析結果とはしていない。この位相分布結果を用いて任意の時刻におけるバーチャルスペックルパターンを作製し、このバーチャルスペックルパターンを用いてフーリエ変換演算の誤差要因を解消させている。具体的には、Fig. 3 に示すように、バーチャルスペックルパターンを作製した時刻 (Point-A) を挟む 2 つの時間領域 (Area-1 と Area-2) で、作製したバーチャルスペックルパターンと実際に採集した実スペックルパターンとの間で Fig. 1 (4) に示すように強度分布の差を二乗演算することによって、空間的な縞画像であるスペックルグラムを求めている¹¹⁾。このようにして求められたスペックルグラムを、二次元フィルタリング処理¹³⁾ すると、時間的情報解析技術において問題視されていた縞画像内のスペックルノイズによる影響を除去することができる。その後、この二次元フィルタリング処理された縞画像を用いて、それぞれの領域での変形に関する位相分布を空間的縞解析法^{11-13,33)} によって Fig. 1 (5) に示すように求めている。これらの処理によって、Fig. 3 に示すバーチャルスペックルパターンを作製した時刻 (Point-A) を挟む 2 つの時間領域 (Area-1 と Area-2) で、Fig. 3 (a) (b) に示す位相分布をそれぞれ検出することができる。

このような処理は、Point-A に限らず、Point-A と同様に、たとえば Fig. 1 (2) の Point-B のような任意の位置においてもバーチャルスペックルパターンを作製することができるので、変形過程の任意の位置でバーチャルスペックルパターンを作製し、Fig. 3 に示す処理を用いることによって、大変形過程のいずれの地点でもここに示す処理を行うことができる利点をもっている。

また、このように検出されたバーチャルスペックルパターン作製ポイントを挟む 2 つの領域の位相分布では、フーリエ変換演算において生じる誤差は同符号として存在し、かつそれぞれの所要位相分布は異なった符号をもって検出されている。したがって、バーチャルスペックルパターンを作製した地点の後半部分の Area-2 の位相分布から前半部分の Area-1 の位相分布を減じると、Fig. 3 (c) に示すようにトータルの位相分布を、フーリエ変換演算において生じる誤差要因を相殺しつつ求めることができる。

この結果、時間的情報解析技術と比較して、バーチャル

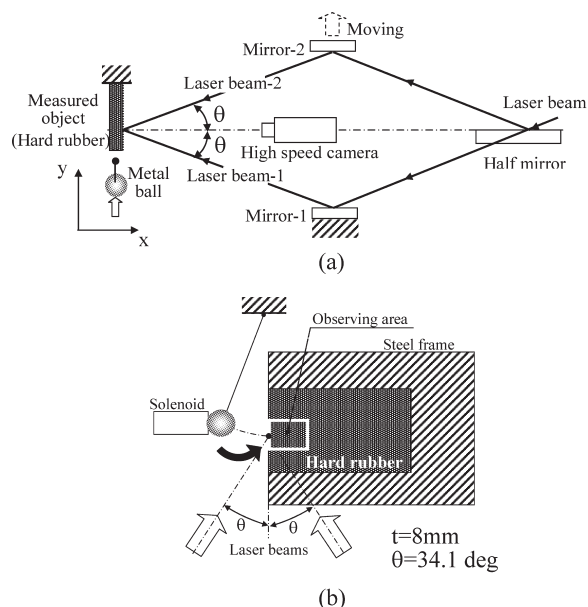


Fig. 4 Optical system for in-plane deformation measurement. (a) Optical system, (b) measured object.

スペckルパターンを挟む2つの時間に関する領域をまたいだ位相分布を高分解能に検出することができる。

以上のように、本手法では、従来行われていた時間的情報解析技術の演算過程を工夫することによって、高分解能な動的変形解析を実現している。

3. パーチャルスペckルパターンを用いた動的面内変形計測

Fig. 4 (a) に示すような面内変形計測光学系²⁷⁾に、Fig. 4 (b) に示すような硬質ゴム板の周囲をスチール板で補強した測定対象 (厚さ 8 mm) を固定し、その端面に金属球が衝突する場合の硬質ゴム板内に発生する面内変形を測定対象とした実験を行った。ここでは、1 秒間に 207 枚の画像を採取することのできる高速度カメラ (IPX-VGA210-L、ピクセル数は 640×480) をシャッタースピード 1/500 s に設定して、Fig. 4 (a) に示す光学系に組み込んでいる。

衝突直後 (0 s) と、各時刻におけるスペckルパターンとの間でスペckルグラムを求めた結果を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 が示すように、本実験では、衝突後 0.242, 0.338, 0.531 s と時間の経過とともに縞数が増加していることがわかる。さらに、0.531 s で最大変位を記録した後に、変形量は減少し、0.676 s では、ほぼ 0.242 s と同程度の変形量に回復していることがわかる。本光学系では、光源として He-Ne レーザー (30 mW) を用いて、測定領域 20 mm×16 mm の面内変位を測定している。Fig. 4 に示す光の入射角 θ を 34.1 deg に設定しているので、1 縞あたり

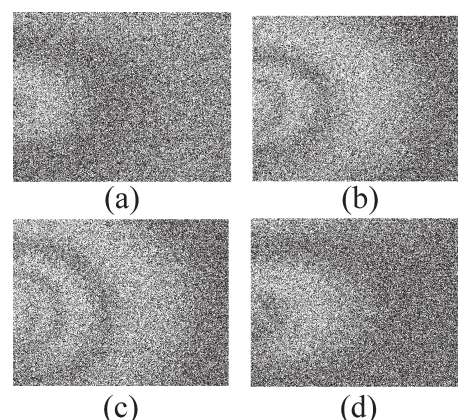


Fig. 5 Specklegrams. (a) 0.242 s, (b) 0.338 s, (c) 0.531 s, (d) 0.676 s.

の変形量は、564 nm である²⁷⁾。このことより、Fig. 5 (c) に示す縞画像が示すように衝突直後からの最大変位は 3 縞程度であり、最大変形量は約 $1.7 \mu\text{m}$ であることがわかる。

このような変形過程において、測定対象の任意の点におけるスペckル強度の変化を次に検討する。

本光学系では、複雑に変形する面内変形解析の実現を目指して、必ずしも変形量が単調増加 (あるいは、単調減少) する状況になくても解析を可能にするために、Fig. 4 (a) に示す光学系の Mirror-2 を圧電素子によって測定時には一定速度で移動させている²⁷⁾。この結果として、測定対象に変形量が存在しない場合には、Fig. 6 (a) に示すように、時間変化に対して定まった周期で、Mirror-2 の移動に伴いスペckル強度を変化させることができる²⁷⁾。本光学系では、この信号を、測定対象変形時の各ピクセルにおける強度変化を記録するための時間的搬送波信号 (搬送波) として利用している。したがって、この搬送波信号は、測定対象の変形量が増大している場合、あるいは、逆に減少している場合には、変形量の位相成分によって変調される変形搬送波信号として観察されることになる。

たとえば、時刻 0 s で、衝突が検出されると画像の記録が開始される。このとき、本測定システムの衝突時刻検出機構との関係で、若干の遅れ時間の後に、変形が始まる様子を確認することができる。Fig. 6 (a) に示す P_A 点 (衝突後約 0.05 s) 近傍から変形は開始する。この結果として、実際の変形時には変形がより明確に観察することのできる Fig. 6 (b) の P_B 点 (30 番目) を過ぎたあたりから、変形搬送波信号の周期は長くなっていることが確認できる。さらに、最大変位が発生する P_C 点 (0.531 s) で、変形搬送波信号は搬送波信号と同じ周期となり、その後周期はさらに短くなっている。

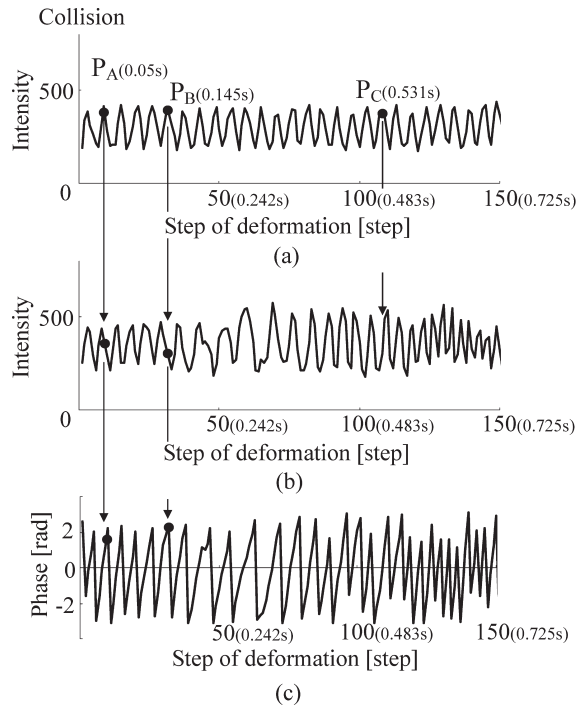


Fig. 6 Change of speckle intensity in deformation process. (a) Carrier information, (b) deformed carrier information, (c) phase distribution in deformation process.

このように、Fig. 4 (a) に示す光学系の Mirror-2 を移動させることによって、変形過程内における変形方向を検出することができる。この処理を行うことによって、変形過程内の変形方向（増加・減少）を考慮することなく、Fig. 6 (b) に示す変形搬送波信号をヒルベルト変換し、その位相分布から、変形量ならびに変形方向を定めることができる。この変形搬送波信号の時間変化に伴う位相分布を Fig. 6 (c) に示す。

ここで、たとえば、30 番目 (P_B 点) の位相を求めるとする。同様の位相検出解析を二次元内すべてのピクセルにおいて実施し、すべてのピクセルでの位相値を求め、これらの結果を二次元配列すると、変形後 30 番目における二次元位相分布を求めることができる。

この結果を用いて、式 (1) に示すモデルに従って強度分布を求めると、前報²⁷⁾ に示したように、空間的なキャリア情報を含んだバーチャルスペックルパターンを、本手法によって作製することができる。

以上の処理によって求めたキャリア情報を含んだ二次元バーチャルスペックルパターンと、衝突後 30 番目 (0.145 s) で採取したスペックルパターンとの間でスペックルグラムを求めたものが、Fig. 7 (a) である。Fig. 7 (a) において、空間領域でのキャリア縞を観察することができる。この縞画像をフーリエ変換したものが、Fig. 7 (b)

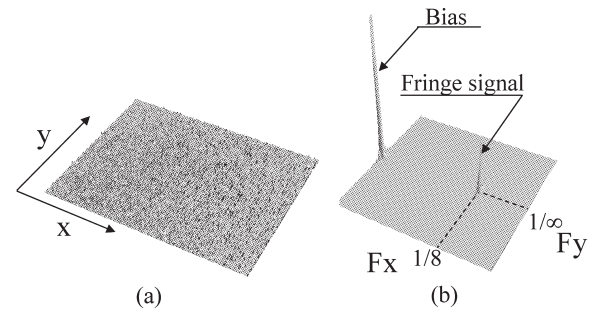


Fig. 7 Carrier fringe at 30th step. (a) Spatial domain, (b) frequency domain.

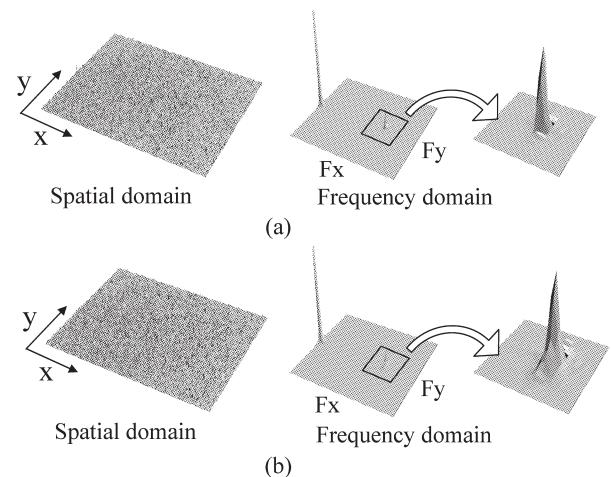


Fig. 8 Deformed carrier fringes. (a) Deformed carrier fringe (0th-30th step), (b) deformed carrier fringe (30th-50th step).

である。ここでは、8 ピクセルが 1 周期となるように空間キャリア信号が与えられていることを確認することができる。

同様に、30 番目で合成した空間キャリア情報を含むバーチャルスペックルパターンと衝突直後、ならびに衝突後 50 番目におけるスペックルパターン間でそれぞれスペックルグラムを求めた結果が、Fig. 8 (a), (b) である。

それぞれのフーリエ変換結果において、0 番目から 30 番目では、キャリア縞はほとんど変形されていない。一方、Fig. 8 (b) に示す 30 番目から 50 番目までの変形過程では、Fig. 8 (a) に示すフーリエ変換結果から若干変形が進んでいることを確認することができる。

Fig. 8 (a), (b) に示した変形キャリア縞から、空間的縞解析法によって位相分布を求め、Fig. 3 に示した要領で、30 番目から 50 番目における変形量から 0 番目から 30 番目までの変形量を減算することによって、衝突後 50 番目 (0.242 s) における変形量を求めることができる。この結果を Fig. 9 (a) に示す。

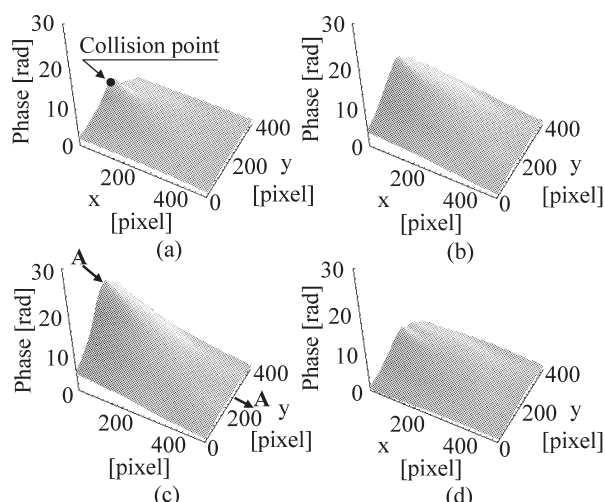


Fig. 9 Measured phase maps. (a) 0.242 s, (b) 0.338 s, (c) 0.531 s, (d) 0.676 s.

このような2つの変形領域で、それぞれ求めた位相量の減算を行うと、Fig. 3に示すように衝突後30番目において作製したバーチャルスペックルパターンがもつ誤差要因を相殺することができる。この結果として、上記のバーチャルスペックルパターンを用いた演算過程によって、高分解能な縞解析を実施できる。ところが、変形が大きくなると、変形前後のスペックルパターン間でスペックルグラムを求めても、変形前後で、対応すべきスペックルパターン内のスペックルがあまりにも大きく移動し、空間的に対応できなくなり、縞が発生しなくなる。この場合には結果的に、縞解析を行うことができなくなる。

この問題は、変形前にキャリア縞を作製するために、あらかじめスペックルパターンを用意する従来法¹¹⁻¹³⁾では、日常的に生じる現象である。本実験においても、本手法の測定精度の比較を行うために実施した従来法による縞解析過程では、衝突後50番目付近までは、縞解析の実施は可能であるものの、衝突後60番目を過ぎると、スペックルグラムを求めても変形キャリア縞が発生しなくなり、縞解析を実施することはできなかった。

同様の問題が、本研究で提案する解析法においても発生する。すなわち、変形量が増大すると、1枚のバーチャルスペックルパターンを作製するだけでは、すべての変形過程を解析することができなくなる。

本研究で扱う動的面内変形計測においても、前報^{26,27)}で示したように、変形が進行するに従って、Fig. 1 (2)に示すPoint-Aのみならず、Point-Bにおいてもバーチャルスペックルパターンを作製することができる本解析手法の性質を用いて、順次バーチャルスペックルパターンを作製し、それらの結果をつなぎ合わせることによって、大変形

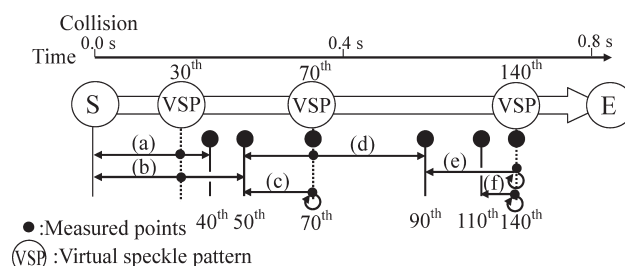


Fig. 10 Phase map analyzing process.

を計測することにした。この変形過程の解析手順をFig. 10に示す。

本研究で対象とする変形過程は、およそ0.8秒内に変形現象は終了するので、1秒間に207枚の画像撮影が可能な高速度カメラを用い、衝突時刻検出機構のトリガー信号検出後、150枚のスペックルパターン画像を連続して採取した。これらの画像を用いて、40番目から140番目までの変形過程をFig. 10に示す6箇所(40th, 50th, 70th, 90th, 110th, 140th)において連続する変形量として求めた。

Fig. 10に示す変形量の小さい衝突直後40番目の変形量の演算は、Fig. 8に示した50番目と同様に、Fig. 10 (a)に示す解析過程において衝突後30番目で作製したバーチャルスペックルパターンを用いることによって求めた。

ところが、70番目での位相分布は、30番目で作製したバーチャルスペックルパターンだけでは、解析を行うことはすでにできなかった。そのために、70番目に新たにバーチャルスペックルパターンを作製した。

この場合、Fig. 10の解析過程(c)に示すように、70番目でのバーチャルスペックルパターンと70番目で実際に撮影したスペックルパターンとの間で求めた位相分布を、70番目でのバーチャルスペックルパターンと50番目で実際に撮影したスペックルパターンとの間で求めた位相分布から、減算することによって50番目から70番目までの位相分布を求め、次に、この結果をすでに求められている50番目の位相分布に加算することにより、70番目で合成したバーチャルスペックルパターンの誤差要因を相殺しつつ、70番目での位相分布として求めることにした。

今回の計測では、110番目(0.531 s)近傍で最大変形(18.3 rad (1.64 μm))が発生する。そのため、すべての測定点において位相分布を求めるために、さらに140番目でバーチャルスペックルパターンを作製する必要があった。本手法では、必要に応じて空間的なキャリア情報を有するバーチャルスペックルパターンを、任意の位置で作製することができる。この性質を用いることによって、従

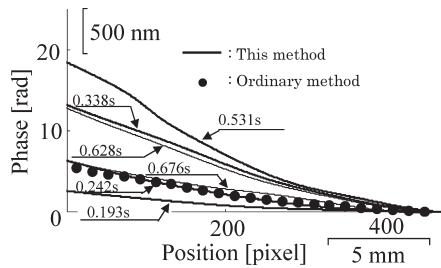


Fig. 11 Deformation distribution on line A-A in Fig. 9.

来法では解析することができない大変形計測も、順次バーチャルスペックルパターンを作製することによって実現することができた。

Fig. 10 に示す解析過程に従って解析した大変形が生じている変形過程の位相分布を Fig. 9 (b), (c), (d) に示す。Fig. 9 (b), (c) に示す結果は、いずれも従来法¹¹⁻¹³⁾では解析することができなかった変形量の大きな領域での測定結果である。

さらに、Fig. 9 (c) に示す A-A ラインにおける位相分布を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の●で示したものが、従来法によって求めた結果である。上記のように、従来法では、50 番目近傍（変形量としては、最大 6 rad 程度、時間的には 0.242 s）までしか解析を行うことができなかった。しかしながら、本手法では、高速度カメラを用いることによって、動的に変形する大変形過程の面内変形解析を必要に応じてバーチャルスペックルパターンを順次作製することにより、高分解能に解析することができた。

ここで、従来法¹¹⁻¹³⁾で解析することのできる 50 番目の位相分布に関して、本手法との比較を行うと、両者の差の標準偏差は 0.0801 rad (7.19 nm) であることがわかった。このことより、本手法では、大変形計測が可能であるのみならず、従来法と同程度の高分解能な計測が動的計測としても実施可能であることがわかった。

4. 動的計測における高速度カメラ特性の計測結果への影響

本報で使用した光学系は、比較的安価に入手可能な 1 秒間に 207 枚の画像を採取することができる高速度カメラ（シャッタースピードは 1/500 s、ピクセルピッチは 7.4 μm 、レンズ倍率は 5.0 倍）を利用している。また、衝突時に発生する硬質ゴム内部の面内変位を測定対象として実験を行った。ところが、この面内変位の進行速度は、前報³⁴⁾に示した面外変位の速度よりもはるかに大きく、実験を重ねる中で、本研究で利用した高速度カメラでは、実験条件によっては計測が困難になることがわかった。そこ

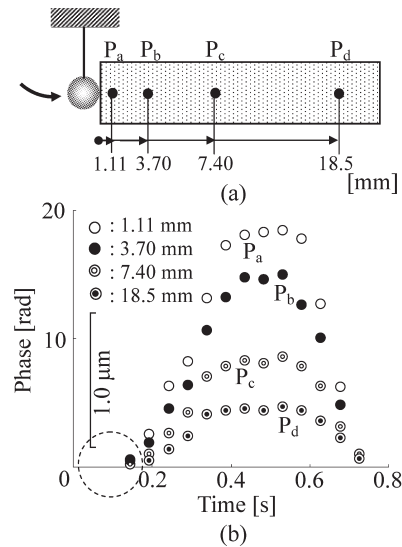


Fig. 12 Relationship between deformation and time. (a) Measured position, (b) deformation of each position.

で、この問題を検討した。

衝突後の時間経過を横軸に、面内変形量を縦軸として、衝突地点からの距離をパラメータとする面内変位の時間経過に対する変形状況を Fig. 12 (b) として取りまとめ、詳細を検討した。Fig. 12 では、(a) に測定点の位置を、(b) に面内変形の時間的経過を示している。

本実験装置では、衝突時刻は振り子（金属球）の位置を衝突の少し前に光学式センサーにより検出している。このセンサーからの衝突信号を受信した後に、カメラが始動し、画像が記録されている。Fig. 6 に示すように、衝突の瞬間は、カメラの画像として 10~20 番目 (0.05~0.10 s) 付近に存在している。また、Fig. 12 (b) においては、面内変形は約 0.10 s 以降に発生しているように観察できる。

Fig. 12 (a) に示すそれぞれの地点において、衝突地点から距離が離れるに従って、その面内変位の絶対量は Fig. 12 (b) に示すように減少している。さらに、それぞれの地点での変形状況を詳細に見るためには、Fig. 12 に示す 0.0483 s ごとの変位観察では、時間刻みが粗すぎるために測定点間の比較による過渡状況の詳細な観察は困難であることがわかった。加えて、それぞれの測定点での最大面内変位量が異なるので、それぞれの測定点間の時間的な変形経過を詳細に比較することは Fig. 12 (b) からは困難であることがわかった。

そこで、カメラの最大の時間分解能である 0.00483 s (1/207 s) ごとに、面内変位がある程度成長する衝突後 0.15 s までの Fig. 12 (b) の破線で示す円内領域を拡大し、かつ P_a, P_d 点での面内変位を P_a, P_d 点でのそれぞれの最

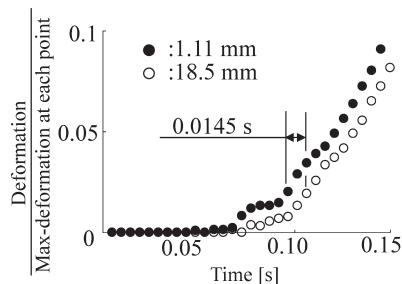


Fig. 13 Velocity of propagation of deformation.

大面内変位量で除することによる標準化を行い，Fig. 13 を作製した。

Fig. 12 では 0.10 s 以降に面内変形が発生しているように見えたものの，Fig. 13 に示すように，金属球の衝突地点から 1.11 mm はなれた P_a 点では 0.05 s 前後から面内変位が発生しはじめていることがわかる．一方，衝突地点から 18.5 mm はなれた P_d 点では若干遅れた 0.075 s 前後から，面内変位が発生しはじめている． P_a ， P_d 点での変形に関する時間差を調べると，平均的に 0.0145 s であった．したがって，ここで計測した衝突による面内変形は，1.2 m/s 程度で進行していると考えられる．本研究で利用した 1 秒間に 207 枚の画像採取しか行うことのできないカメラでは，ここに示す結果以上に時間的に詳細な解析は困難であった．さらに時間分解能の高いカメラを利用すると，変形が発生しはじめる変形開始直後の状況を詳細にとらえることができるものと思われる．変位の進行速度についても，ピクセル間隔のより小さいもの，カメラ倍率の小さいものを利用した場合には，より詳細に検討できるものとする．今後，このような特性をもつ高速度カメラを用いた検討が必要であると考えている．

次に，変形開始直後の過渡状況をより詳細に観察するために，Fig. 11 に示した変形の状況を示すグラフを，Fig. 14 に示すように $t=0.05$ s 前後（10 番目の画像前後）で調べた．

Fig. 13 の結果より，0.0483 s（10 番目）を衝突時刻と考えて，その 0.00483 s 後（11 番目の画像， $t=0.0531$ s）の変位，さらに 0.00966 s 後（13 番目の画像， $t=0.0628$ s），ならびに $t=0.0725$ s（15 番目の画像）の変形量を Fig. 14 に示す．

衝突後 0.00483 s に相当する $t=0.0531$ s では，変形曲線と横軸との交点は，衝突地点から 7 mm 程度の A の位置にある．さらに， $t=0.0628$ s では，衝突地点から 12 mm 程度進んだ B の位置で観察することができる．また， $t=0.0725$ s では，交点の位置はすでに枠外に外れている．こ

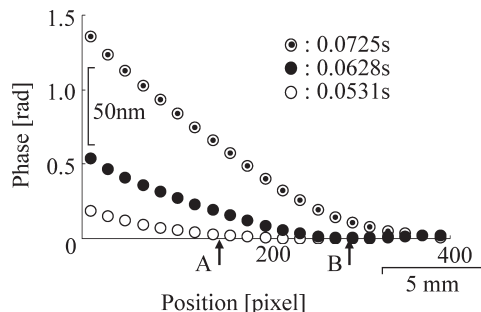


Fig. 14 Deformation behavior in transient zone.

こで，前述のように変形の進行速度を 1.2 m/s とすると， $t=0.0531$ s では衝突後 0.00483 s が経過しているのて，5.8 mm， $t=0.0628$ s では 17.4 mm にそれぞれ変位は進行していることになる．Fig. 14 の A，B の位置とは若干の相違はあるものの，ほぼ Fig. 13 で求めた変位の進行速度に従って，過渡状況においても変位は進行していることが，本計測システムによって確認することができる．

Fig. 14 に示すように，衝突面から 1.11 mm はなれた地点では，最初の 0.00483 s の間に 0.19 rad（17 nm）変位し，次の 0.00966 s の間にはほぼ比例した変位 0.35 rad（31 nm）が生じている．さらに，次の 0.00966 s の間には 0.82 rad（73.6 nm）変位が生じるなど，変位の増加の割合は衝突後徐々に増大していることがわかる．

さらに，Fig. 14 の時刻 $t=0.0531$ ，0.0628，0.0725 s における変形分布を観察すると，衝突直後より，上記のように徐々に衝突地点での変位が増加し，面内変位の進行方向への空間分布の変化率（変位の空間に対する傾き）が徐々に大きくなっていることがわかる．すなわち，衝突後面内変位は，空間的に一定の比率で進行するのではなく，徐々に時間とともに増加しつつ進行方向に発生していくことがわかる．

本研究で利用したカメラでは，衝突地点に生じると考えられる局所的な変形現象を確認することはできなかった．衝突後の次の画像（0.00483 s 後）を解析した結果では，Fig. 14 の $t=0.0531$ s のグラフが示すように，すでに変形は，衝突後進行した空間的に滑らかな変形曲線としてとらえられるにとどまっている．この点については，本実験条件下の衝突現象では，ここで想定しているようなきわめて短時間内の局所的な変形現象は発生していない可能性も考えられるので，より高速度撮影が可能なカメラを用いることによって，今後検討する必要があるものと考えている．

ところで，ここに示す 1.2 m/s の速度で進行する面内変位を 1 秒間に 207 枚の時間分解能で撮影した場合には，本来高速に変化する現象に影響され，高い分解能での変位

の解析は困難が生じるのではないかと考えられる。この点についての本実験における検討結果を次に示す。

本実験においても、この問題は測定精度の維持において重要な検討事項である。ところが本実験条件では、Fig. 12 に示すように、最大変形が生じる地点においてもその変位量は 20 rad ($1.8\text{ }\mu\text{m}$) 程度であり、かつそれが 0.3 s 程度の間に発生している。したがって、1/500 s のシャッタースピードでは、シャッターが開放されている間に 0.13 rad (1/48.3 縞) しか縞は移動しない。したがって、本実験条件のように変位の絶対量が小さい場合には、スペックルパターン内のスペックル強度の変化は、測定結果に大幅に影響を与えることなく計測可能であるものと思われる。すなわち、変位の進行速度が大きい場合にも、変位量が小さい場合には、シャッタースピードの適切な設定によって動的な面内変形計測が可能であることがわかる。

以上のように、面内変位計測では、一般に測定対象としての面内変形の進行速度が面外変形に比べて高速であることより、面内変形計測時の測定条件をより厳密に設定する必要があることがわかった。一方で、これらの高速度カメラに関する測定条件を適切に設定しさえすれば、バーチャルスペックルパターンを用いた動的な面内変形計測も、動的な面外変形計測³⁴⁾と同様に高精度に実現可能であることがわかった。

5. おわりに

本研究では、前報に示したバーチャルスペックルパターンを用いたスペックル干渉計測法を動的な面内計測へ適応した場合について検討した。実験結果より、前報²⁷⁾に示した手法が、高速度カメラを導入することによって動的な面内変形計測へも適用可能であることを示した。

さらに、本手法が、圧電素子を用いて搬送波信号を発生させる工夫によって、変形過程において、単調増加のみならず位相がローカルに減少する、あるいは増加するような複雑な変形過程の解析も実現可能な高分解能変形解析法であることを示した。

また、従来の 3 枚のスペックルパターンを用いた変形解析では処理することができなかった大変形解析においても、本手法の特徴を生かして大変形過程を複数の小変形過程に分割することによって、変形解析処理の実現が可能であることを示した。

加えて、現状で利用可能な高速度カメラを用いた面内変形計測における、動的計測時のカメラ特性との関係を検討した。本研究で利用した高速度カメラ (1 秒間に 207 枚の画像を採取可能、シャッタースピードは 1/500 s に設定)

でも、測定条件を適切に設定することによって、比較的な変位が小さい場合には、高速に変化する動的な面内変形を測定対象とした場合においても、高分解能に計測が実施可能であることがわかった。

文 献

- 1) D. Malacara: *Optical Shop Testing* (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 2) R. S. Sirohi: *Speckle Metrology* (Marcel Dekker, New York, 1993) pp. 99-234.
- 3) G. Cloud: *Optical Methods of Engineering Analysis* (Cambridge University Press, New York, 1995) pp. 409-476.
- 4) B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) pp. 1-518.
- 5) J. Kato, I. Yamaguchi and Q. Ping: "Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 77-83.
- 6) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 7) K. A. Stetson and R. L. Powell: "Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse object," *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 1694-1695.
- 8) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
- 9) M. Kujawinska: "Spatial techniques of automatic fringe pattern analysis," *SPIE, 1991 International Symposium on Optical Applied Science and Engineering, Short Course-77 Textbook* (SPIE, 1991) pp. 2-16.
- 10) P. Meinschmidt and K. D. Hinsch, R. S. Sirohi and B. J. Thompson: "Selected papers on electronic speckle pattern interferometry principles and practice," *SPIE Milestone Series Volume MS 132* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) pp. 457-518.
- 11) 新井泰彦, 横関俊介: "2 次元空間的縞解析法のスペックル干渉法への適用", *光学*, **29** (2000) 250-255.
- 12) 新井泰彦, 横関俊介: "空間的縞解析法を用いた電子的スペックル干渉法のパラメーターの設定", *光学*, **30** (2001) 49-55.
- 13) 新井泰彦, 藤本雅大, 横関俊介: "空間的縞解析法を用いた電子スペックル干渉法におけるオプティカルディスロケーション発生とフィルタリング処理との関係", *光学*, **31** (2002) 562-567.
- 14) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: "Electric speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method using two cameras," *J. Mod. Opt.*, **55** (2008) 281-296.
- 15) C. Joenathan, B. Franze, P. Haible and H. J. Tiziani: "Large in-plane displacement measurement in dual-beam speckle interferometry using temporal phase measurement," *J. Mod. Opt.*, **45** (1998) 1975-1984.
- 16) C. Joenathan, B. Franze, P. Haible and H. J. Tiziani: "Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2608-2614.
- 17) G. H. Kaufmann: "Phase measurement in temporal speckle pattern interferometry using the Fourier transformation method with and without a temporal carrier," *Opt. Commun.*, **217** (2003) 141-149.
- 18) Y. Fu, C. J. Tay, C. Quan and L. J. Chen: "Temporal wavelet analysis for deformation and velocity measure-

- ment in speckle interferometry,” *Opt. Eng.*, **43** (2004) 2780–2787.
- 19) Y. Arai and S. Yokozeki: “Control of phase of fringes in speckle interferometry for application of fringe scanning method,” *J. Mod. Opt.*, **52** (2005) 1355–1366.
 - 20) V. Madjarova, S. Toyooka, R. Widiastuti and H. Kadono: “Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase,” *Opt. Commun.*, **121** (2002) 35–43.
 - 21) J. L. Marroquin, M. Servin and R. Rodriguez-Vera: “Adaptive quadrature filters and the recovery of phase from fringes pattern image,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1742–1753.
 - 22) J. L. Marroquin, R. Rodriguez-Vera and M. Servin: “Local phase from local orientation by solution of a sequence of linear system,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 1536–1544.
 - 23) K. G. Larkin, D. J. Bone and M. A. Oldfield: “Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. I. General background of the spiral phase quadrature transform,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (2001) 1862–1870.
 - 24) J. A. Quiroga, M. Servin, J. L. Marroquin and J. A. Gomez-Pedrero: “An isotropic n-dimensional quadrature transform and its applications in fringe pattern processing,” *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III* (Munich, Germany, 2003), *Proc. SPIE*, **5144** (2003) 259–267.
 - 25) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: “変形計測過程の情報のみを用いた高分解能スペックル干渉計測法の開発”, *光学*, **36** (2007) 475–484.
 - 26) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: “単調位相増加条件を必要としない変形過程情報のみを用いた高分解能スペックル干渉計測法”, *光学*, **37** (2008) 41–49.
 - 27) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: “電子スペックル干渉計測におけるバーチャルスペックルパターンを用いた面内変形計測”, *光学*, **37** (2008) 119–129.
 - 28) 谷田貝豊彦: 第二版応用光学光計測入門 (丸善株式会社, 2005) pp. 141–146.
 - 29) 三上直樹: はじめて学ぶディジタル・フィルタと高速フーリエ変換 (CQ 出版, 2005) pp. 171–188.
 - 30) S. L. Hahn: *Hilbert Transforms in Signal Processing* (Artech House, Norwood, MA, 1996) pp. 3–396.
 - 31) S. Haykin: *Communication Systems* (John Wiley & Sons, New York, 2001) pp. 373–380 and pp. 723–725.
 - 32) J. Y. Stein: *Digital Signal Processing* (John Wiley & Sons, New York, 2000) pp. 279–288.
 - 33) 新井泰彦, 倉田忠雄: “縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法”, *光学*, **15** (1986) 402–406.
 - 34) 新井泰彦, 平井宏之, 横関俊介: “マルチカメラ技術によるスペックル干渉計測”, *光アライアンス*, **19**, No. 5 (2008) 21–25.