

連続取込みスペックル干渉画像における初期位相測定法

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42441

連続取込みスペックル干渉画像における初期位相測定法*

安達 正明** 稲部 勝幸***

Key words: specklegram, phase measurement, deformation, DSPI

1. 緒 言

スペックル干渉法と干渉画像のコンピュータ処理を組み合わせるDSPI (Digital Speckle Pattern Interferometry) は粗面のサブミクロンの変形でもそれを位相変化量として高精度に測定できるため、変形測定に広く用いられている。このDSPIで位相変化量を求めるために良く使われるのは位相シフト法である。しかし、位相シフト法では物体面を静止状態に保ちながら参照波面のみを特定量(位相)シフトする必要があり、変形の前後で物体面が止まっている状態を必ず必要とした。

一方、物体面が止まっていなくても位相を測定できる手法もこれまでにいくつか開発されてきている。カメラを3台用いる方法¹⁾、Space Career Phase Shifting法²⁾、Career FringeをFFT (Fast Fourier Transformation) を用いて解析する方法³⁾、さらにはスペックル強度を空間平均で取り除く方法⁴⁾等である。しかし、3台のカメラを用いる方法は装置が高価でカメラ位置の調整も難しい。他の3つは一般的な位相シフト法に比べ空間分解能が劣るとされる。

近年、アナログICやデジタルICが高速化し、カメラからのビデオ信号を高速でコンピュータに連続取込みし、解析することが可能となってきた(4万枚/秒の取込みが可能なシステムもある)。これらのシステムは単発の変形現象に対しても動的解析の可能性を与える点で注目される。ところで連続して干渉画像データを取り込めることは、位相測定において干渉光強度の最大値、最小値を利用することを可能にする。これは光路差の小さな変化に対して干渉光強度を連続して取り込めるためである。

干渉光強度の最大値、最小値を位相測定に利用する研究例として1995年のWangらの報告がある⁵⁾。変形下での干渉光強度変化を1台のカメラを用いて連続取込みして変形の時間変化を測定した。連続的に取り込んだデータより、変形に伴う干渉光強度の最大値と最小値をピクセルごとにまず算出し、測定したい瞬間の干渉光強度より、その位相の情報を \cos^{-1} を用いて求めている。

しかし、使われる \cos^{-1} は偶の多価関数である。故に \cos^{-1} からは位相の絶対値しか求まらない。そこで、Wangらは位相を求めたい時点ではその時の干渉画像と共に、位相シフトをしたもう1枚の画像(変化の増減から符号を求めるため)を取り込んだ。その結果、時間分解能は取込速度の半分となった。さらに位相値がゼロや π 付近では符号の判定に誤差が入りやすく、これを避けるため特別な処理が必要であった。

* 原稿受付 平成12年2月28日

** 正 会 員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 金沢大学工学部

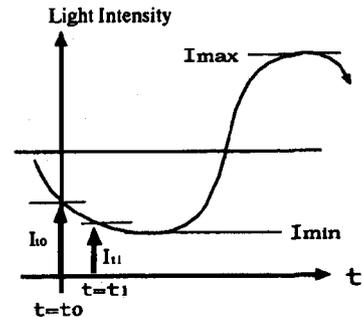


Fig.1 Light intensity change on a pixel of CCD camera under continuous surface deformation

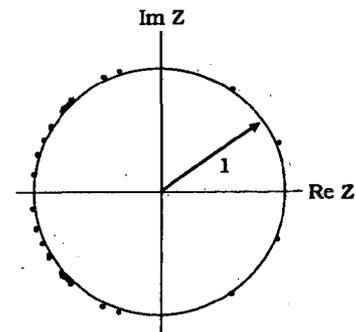


Fig.2 Complex plane plotting of $Z = \exp(i \Delta \phi_j)$

一方、安達らは \cos^{-1} 演算を使うが符号決定のための余分な画像を取り込む必要のない方法を1997年に報告している⁶⁾。ただし測定初期の一時点で位相が正確に求められていることを必要とした。彼らは初期位相測定に位相シフト法を用いており、この点で最初は物体の変形が止まっている必要があった。

今回、初期位相を変形の止まっている状態を全く用いないで決定できる方法を我々は新たに開発した。この方法と安達らの方法⁶⁾を組み合わせることで、変形し始めている物体に対して干渉画像をカメラに連続的に取り込むだけで、取込み時間域すべてで位相測定を行うことが可能となった。この方法を前述の高速カメラと組み合わせると単発変形現象でもより詳しく動的変形を解析できることになると思われる。

2. 連続取込み画像からの初期位相測定の原理

変形により変化し続けているスペックル干渉光強度をカメラで連続取込みした場合、ある画素の光強度変化は図1のようなになる。今、図1の $t=t_0$ での初期位相測定を取り扱う。まず図の光強度変化から、その画素での最大光強度 I_{max} と最小光強度 I_{min} を求める。そして、 $t=t_0$ と $t=t_1$ での干渉光強度 I_{t_i} ($i=1,2$)を

用いて $\phi_{ti} = \cos^{-1} \{ [I_{ti} - (I_{max} + I_{min})/2] / [(I_{max} - I_{min})/2] \}$ を計算する。cosinは偶関数のため位相の符号は決定できない。そこで $t=t_0, t_j$ での位相の絶対値から $\pm \phi_{t_0}, \pm \phi_{t_j}$ の4種の位相を考え、1画素につき4種類の $\Delta \phi_f (\pm \phi_{t_j}) - (\pm \phi_{t_0})$ を計算する。そして、 $Z = \exp(i \Delta \phi)$ を測定対象画素を中心とする局所領域(3×3)について複素空間でプロットする。このプロットは図2のようになる。この分布は $\Delta \phi_f$ が符号に関し対称だから実軸に関し対称である。そこで上半面の領域についてのみ1画素あたり2種類の合わせて18個のプロットを行い平均する。このプロットは位相変化量に対して正しい値を与える点を確率50%で含む。正しい点は偏角が変形量に比例するので局所領域でほぼ一定値を採る。一方、正しくないプロット点はスプレックル位相のランダム性の影響を受け、平均処理でその影響はゼロに近づく⁶⁾。故に18個の平均から位相変化量が求まる。ここで $Z = (I_{max} - I_{min})/2 \exp(i \Delta \phi)$ としてプロットすると平均値の精度はさらに上がる。(I_{max}-I_{min})/2は図1の信号変化のModurationを表し、これが大きい点は信号取込みで避けられないランダム雑音下で信号対雑音比の高い位相変化量を与えるからである。この分布を図3に示す。平均値の偏角 $\Delta \psi$ は位相変化量となる。この位相変化量を、図1の $t=t_0$ 以降に連続して取り込んだ何十枚かについてプロットしてみると図4のようになる。ここで $t=t_j$ 付近では $\Delta \psi$ はピークを採り、それ以後は減少している。これはピーク値では変化量が約 π であり、それ以降は図3の上半面で計算された位相変化量が実軸の下に入り込み、一方で実軸の下にあった対称成分が上半面に現れるためである。このことは $0 < \text{位相変化量} < \pi$ ならば、変化量が $\Delta \psi$ で正しく抽出できることを示す。ただし、この変化量は常に絶対値で与えられるので光路差が短くなったのか長くなったのかは分からない。もし変形が測定初期に一方方向に進むことが知られているなら全画素で変化の符号は同じと考えることができ、この方向の変化を正として位相変化量 $\Delta \psi$ が符号を含めて求まる。そこで、 $t=t_0$ と $t=t_j$ で取り込まれた光強度から $\cos \phi_{t_0}$ と $\cos(\phi_{t_0} + \Delta \psi)$ が分かっているので、これらと $\Delta \psi$ を用いて次式より $\sin \phi_{t_0}$ を計算し、そして ϕ_{t_0} が求まる。

$$\sin \phi_{t_0} = \frac{\cos \phi_{t_0} \cos \Delta \psi - \cos(\phi_{t_0} + \Delta \psi)}{\sin \Delta \psi} \quad (1)$$

$$\phi_{t_0} = \arg(\cos \phi_{t_0} + i \sin \phi_{t_0})$$

もし画像内の個々の部分で変形の方向が異なるならば、 $t=t_0$ の取込み直後に強制的に参照光路を少し(位相変化量が約 $\pi/2$ に相当する量)だけ短時間に短くし、その直後の画像も取り込む。この時、強制変化のスピードを物体変形のスピードよりも速くできれば、変形による変化を含んでも画像内で位相は $0 < \text{位相変化量} < \pi$ となる。故に式(1)の議論が成立し、 $t=t_0$ の初期位相が符号を含めて求まる。なお、ここでの ϕ_{t_0} は画素ごとに異なる値であって、参照光路を短くする方向を位相が増える方向として全画素で位相が求まる。

3. 初期位相決定以後の位相測定法

I_{max}, I_{min} と $t (t > t_0)$ での光強度 I_t を用いて $\phi_t = \cos^{-1} \{ [I_t - (I_{max} + I_{min})/2] / [(I_{max} - I_{min})/2] \}$ を計算する。これと先の方法で求めた $t=t_0$ での位相 ϕ_{t_0} から、 $\Delta \phi_t = \pm \phi_t - \phi_{t_0}$ を求める。そして複素空間で $Z = (I_{max} - I_{min})/2 \exp(i \Delta \phi_t)$ を測定対象画素を中心とする局所領域(3×3)についてプロットする。これは実軸

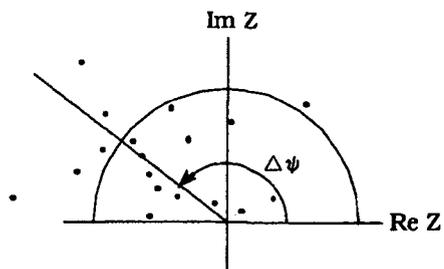


Fig.3 Complex plane plotting of $Z = (I_{max} - I_{min})/2 \exp(i \Delta \phi_f)$

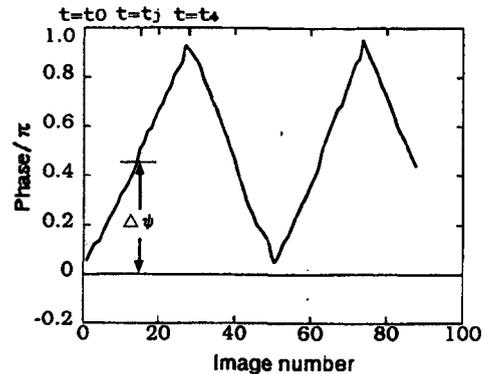


Fig.4 Changes of $\Delta \psi$ in Fig.3 on continuously captured images

に非対称であり、この場合も正しい位相変化量を含む点が50%となる。それ以外はスプレックル位相のランダム性の影響を受けており平均処理でその影響は消える。そこで複素空間のすべての値を平均すると平均値の偏角から t での位相変化量が符号を含めて求まる⁶⁾。これと ϕ_{t_0} より位相が与えられる。

4. 結 言

カメラからのビデオ信号を連続してコンピュータに取り込んでデータ解析できるシステムで、物体の変形開始後にスプレックル干渉画像を取り込んで、測定初期の位相を計算する方法を報告した。この方法を先に報告した方法⁶⁾と組み合わせることで、連続的に変形し始めている物体に対してもその干渉画像から位相測定を行うことが可能となった。

参 考 文 献

- 1) A.J.P.v.Haasteren and H.J.Frankena: Real-time Displacement Measurement Using a Multicamera Phase-stepping Speckle Interferometry, *Appl.Opt.*, **33**, 19 (1994) 4137.
- 2) G.Pedriani and H.J.Tiziani: Double-pulse Electronic Speckle Interferometry for Vibration Analysis, *Appl.Opt.*, **33**, 34 (1994) 7857.
- 3) 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**, 1 (1982) 156.
- 4) S. Yoshida, Suprapedi, R.Widiastuti, E. Astuti and A.Kusnowo: Phase Evaluation For Electronic Speckle-pattern Interferometry Deformation Analyses, *Opt. Lett.*, **20**, 7 (1995) 755.
- 5) J.Wang and I.Grant: Electronic Speckle Interferometry, Phase-mapping and Nondestructive Testing Techniques Applied to Real-time, *Thermal Loading, Appl.Opt.*, **34**, 19 (1995) 3620.
- 6) M.Adachi and Y.Ueyama: Automatic Deformation Analysis in Electronic Speckle Pattern Interferometry Using One Speckle Interferogram of Deformed Object, *Opt. Rev.*, **4**, 3 (1997) 429.