

スペックル干渉計によるモジュレーション変動下の変形計測の改良

金沢大学 高山稔、安達正明、稲部勝幸

1. 目的

スペックル干渉計を用いると、変形を起こしている粗面の変位の2次元的な分布をサブミクロンオーダーで調べることができる。そこで、我々はアルミニウムを引張り、その干渉画像をカメラで連続に取り込み、光強度の最大値と最小値(差をモジュレーションと呼ぶ)を利用し位相の変化量を求め、その値から物体の変形量を精度よく定量的に測定できる方法を研究してきた。しかし、以前の解析法では残念ながら計算不可能な箇所が存在した。今回はその改良法について報告する。

2. 実験装置

図1に実験装置概略図を示す。小型の引張り試験機にアルミ板を取り付けひずみ速度(約3.7μm/秒)を一定にして、カメラで干渉像を連続してコンピューターに取り込む。カメラは1280×64画素を135画像/秒の速度で取り込める。8000枚取り込んだ画像データはいったんハードディスクに保存したあと、解析用プログラムで読み出し、位相変化量を以下の方法で抽出した。

3. 位相変化量抽出の原理

3.1 初期位相の決定法¹⁾

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 $I_i (i=1,2)$ を用いて $|I_i| = \cos^{-1}\{[I_i - (I_{max} + I_{min})/2] / [(I_{max} - I_{min})/2]\}$ を計算する。 \cos は偶関数のため位相の符号は決定できないため、 $t = t_0, t_1$ での位相について符号が正負の2種類の候補を考える。そして、 $Z = \{(I_{max} + I_{min})/2\} \exp(i\theta)$ を測定対象画素を中心とする局所領域(5×5)について複素空間でプロットする。この分布は θ の符号に関し対称なので、上半面の領域についてのみプロットを行い平均する。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とる。一方、正しくない点はスペ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。故に、25個の平均から位相変化量が求まる。 $t = t_0$ の取り込み直後に強制的に参照光路を少しだけ短くし、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全画素で一方向に変形は進む。故に以下の式より $t = t_0$ での位相を求める。

$$\sin \theta_0 = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_1} \quad (1)$$

$$\theta_0 = \arg(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) \quad (2)$$

3.2 初期位相決定後の位相抽出法¹⁾

I_{max} 、 I_{min} と t での光強度 I_t を用いて $\theta_t = \cos^{-1}\{[I_t - (I_{max} + I_{min})/2] / [(I_{max} - I_{min})/2]\}$ を計算する。これと先の方法で求めた $t = t_0$ での位相 θ_0 から、 $\theta_t = \pm \theta_t - \theta_0$ を求め、 $Z = \{(I_{max} + I_{min})/2\} \exp(i\theta_t)$ をプロットする。しかしスペックル形状が激しく変化するにつれ I_{max} 、 I_{min} も変化するため、正しく位相が求められない。そこで、としてモジュレーションが特に小さいものは除去する。複素空間で残りの値を平均すると平均値の偏角から t での位相変化量が求まる。一定画像枚数(300枚)の周期で、変化する I_{max} と I_{min} を更新しながら θ_0 に θ_t の加算を繰り返すと大変形への対応ができそうに思える。しかし、300枚の中に I_{max} 、 I_{min} が必ず存在するよ

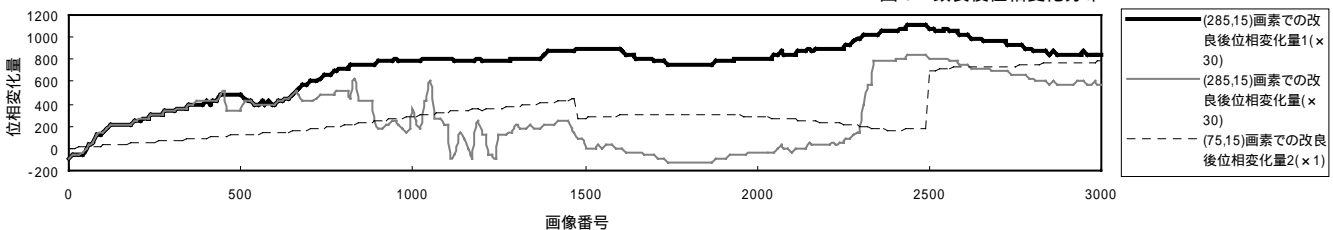


図4 1点の位相結果

うに単純に処理画像枚数を増やしただけでは、上記の理由が影響するため正しく位相が求められない。さらに t として、300枚前の I_{max} 、 I_{min} と現在の I_{max} 、 I_{min} を比較することにより、適切な計算枚数 x 枚を算出する。そして、上記の方法で位相を計算し、 x 枚目になると下式の積分計算により新たに x 枚目の位相を求める。積分範囲は x 枚目の位相から2つ少ない時点 t_k から x 枚目の時点 t_x までである。ここでは t_k から t_x までの位相変化量 $\theta_{t_k} - \theta_{t_x}$ とすると、 $I_t = I_0 \cos(\theta_{t_0} + \theta_{t-x}) + I_{ave}$ と近似できることを利用している。ただし I_{ave} は I の平均値である。

$$I_c = \int_{-2}^0 \{I_0 \cos(\theta_{t_0} + \theta_{t-x}) + I_{ave}\} \cos d = I_0 \cos \theta_t \quad (3)$$

$$I_s = \int_{-2}^0 \{I_0 \cos(\theta_{t_0} + \theta_{t-x}) + I_{ave}\} \sin d = -I_0 \sin \theta_t \quad (4)$$

故に、この2式から時間 t での位相 θ_t を次式で計算する。

$$\theta_t = \arg(I_c - iI_s) \quad (5)$$

これをその時点以降の抽出のための初期位相として使用し、 t_k の抽出と t_x の計算を x 枚毎に繰り返した。

4. 実験結果

測定結果を図2、3、4に示す。図2が改良前、図3が改良後になり、左側が大きく伸びている部分、右側が伸びていない部分である。図4は一点を抜き出したものであり、太線が改良前位相変化量1、細線が改良後位相変化量であり、各々図2、3の(285、15)の位置を抜き出しており30倍してある。また破線が図4(75、5)の位置の位相変化量になっている。図3の左側の変形の大きい部分の位相変化量(約1060rad)と、図1に示したレーザービームの交差角(0.46rad)、ならびにレーザー光の波長(0.78μm)から3000枚目までの全変化量を見積もると約82μmとなることが計算できる。

5. 今後の研究課題

図4の改良後位相変形量2より1500枚目から2500枚目の位相計算が解析不能となっていることが推測できる。今後はこういった部分の原因を解明し全域で解析可能とすることを考えている。

参考文献

1)高山、安達、稲部、松本：スペックル干渉計でのモジュレーション変動下の連続大変形計測、精密工学会誌 Vol.68, No.10, 2002

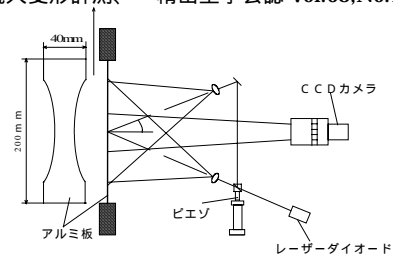


図1 実験装置概要図

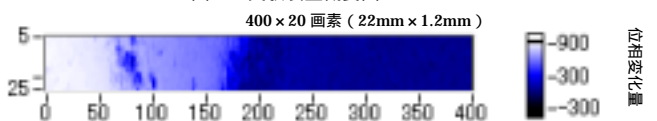


図2 改良前位相変化分布

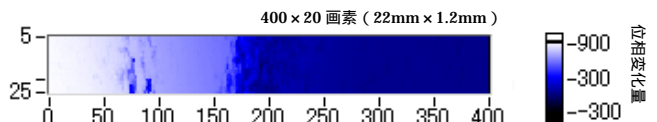


図3 改良後位相変化分布