

## 振動環境下で撮影された白色干渉像からの高精度位相抽出

金沢大学 自然科学研究科 ○丹羽康人, 岩尾雄太, 安達正明

Phase Extraction from white-light Interferograms captured under Vibrating Environment

Kanazawa University Yasuhito Niwa, Yuta Iwao, Masaaki Adachi

We are developing a 3D-shape measurement technique using a vertical-scanning interference microscope set in unavoidable vibrating environment. With OPD changing data real-timely measured by a laser displacement meter, a 2D camera can start exposure of in-coherent light interferogram at desired phase-shift moments. But, the in-coherent light power is usually low, then exposure time is required long and OPD change in the long exposure time would cause phase extraction error. Here, we propose extraction technique of phase at the start moment of the exposure using OPD changing data.

### 1. 研究の背景

我々の研究室では以前に、垂直走査型干渉顕微鏡を用いた3次元形状計測の高速化の研究<sup>1)</sup>を行った。2種のLED干渉画像をCCDカメラで交互に撮影し、位相シフト法によって形状計測を行う。行う際に、低コヒーレント光源で応答速度の速いLEDの特徴を利用し、高速化を実現している。

その後、本干渉顕微鏡の振動環境下への活用を考え、試料ステージと顕微鏡間の距離が外部振動によって変動したとしても、正確な位相シフトを行ってLED干渉画像を撮影する為に、露光開始時点(LED点灯タイミング)を制御する研究<sup>2)</sup>も行った。この制御では、レーザ変位計を本干渉顕微鏡に追加装着した。レーザ変位計で外部振動及び垂直走査による光路差変化をリアルタイムに計測し、位相シフト法による計算に必要な光路差変化に達した瞬間に露光を開始し、画像を取込む。この露光開始時間の制御により外部振動の影響は大きく軽減された。

しかし、振動環境下における高精度計測の問題は他にもある。それは、振動環境下ではLED干渉光をカメラのCCD画素に露光している間に、外部振動により光路差が不規則に変化すると、その干渉光変化も画素に蓄積されてしまい、位相抽出の誤差となる問題である。図1の実線のように光路差が振動の影響を受けて不規則に変化する場合、露光して得られる光強度変化の波形は、図1中の点線のように元の光強度変化と大きく異なる。この現象は長時間の露光が必要な低輝度光源において大きく現れる。本干渉顕微鏡のLEDも低輝度であり、この長時間露光の問題を解決する必要がある。

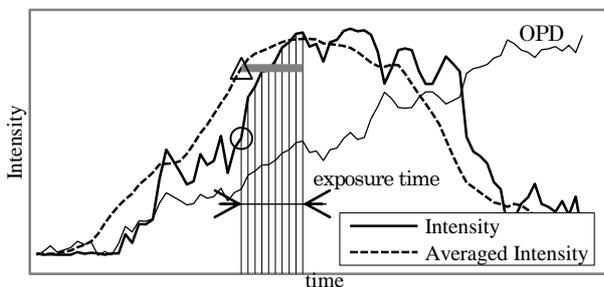


図1 振動環境下での垂直走査中から得られる光路差変化と光強度変化及び露光開始時の光強度(○)と長時間露光より得られる光強度(△)

### 2. 研究の目的

垂直走査型干渉顕微鏡における、振動環境化での長時間露光の問題を解決する為、レーザ変位計より得た露光中の光路差変化情報を利

用し、低輝度光源干渉顕微鏡における位相抽出の高精度化を行う。

### 3. 研究の方法

#### 3.1. 問題の解決手法

露光中の光路差変化情報を用いて、長時間露光によって得る光強度から露光開始時の位相を抽出することで精度を向上させる。この位相を抽出する手順を以下に示す。

1. 垂直走査中にレーザ変位計により光路差変化をリアルタイムに計測し、位相シフト法に必要な走査量変化毎に露光開始信号をカメラへ送る。
2. 信号毎にLED干渉画像撮影を開始する。同時に露光中の光路差変化情報をレーザ変位計より取得する。
3. 取得した光路差変化量  $h_i(t)$  と後述の式(2)を用いて  $C_i$ ,  $S_i$  を計算する。
4.  $C_i$ ,  $S_i$  とLED干渉画像を用いて、位相シフト法による計算を行い、より高精度な位相を算出する。

手順3, 手順4に関して位相の計算式の導出を以下に示す。LED光の強度変化のモジュレーションの振幅  $A_i$  とし、露光中の時間  $t$  に関して垂直走査や外部振動等によって測定値が高さ  $h_i(t)$  で変化するとした時、 $i$  番目の画像の干渉光強度  $I_i$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} I_i &= A_i \int_0^T \cos \left[ \phi_i + \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} \right] dt + I_0 \\ &= A_i \int_0^T \left[ \cos \phi_i \cdot \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} - \sin \phi_i \cdot \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} \right] dt + I_0 \quad (1) \\ &= \cos \phi_i \cdot A_i \int_0^T \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt - \sin \phi_i \cdot A_i \int_0^T \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt + I_0 \\ &= \cos \phi_i \cdot C_i - \sin \phi_i \cdot S_i + I_0 \end{aligned}$$

ここで、 $C_i$  と  $S_i$  は

$$\begin{aligned} C_i &= A_i \int_0^T \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt \\ S_i &= A_i \int_0^T \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt \end{aligned} \quad (2)$$

であり、式(1)の  $\phi_i$  は求めるべき露光開始時の位相である。

ここで、高精度形状計測に広く使われるシフト位相法への応用を考える。位相シフト法は位相抽出精度を上げるために4画面、5画面、7画面、さらに多くの画面を利用する方法もこれまでに開発されているが、今回は使用画面数が多くなく抽出位相の対雑音強度比の点で現在も広く使われている5画面法を取り上げる。5画面法における、その3画面目の位相は

$$\phi_{3\_5f} = \tan^{-1} \left[ \frac{2I_2 - 2I_4}{2I_3 - (I_1 - I_5)} \right] \quad (3)$$

で計算される。この式の両辺をよく見ると右辺の引数の分母は  $\cos \phi_{3\_5f}$  に強い相関を持っていることが分かる。そこで分母を式(1)を使って変形してみると

$$\begin{aligned} 2I_3 - (I_1 + I_5) &= 2\cos\phi_3 \cdot C_3 - 2\sin\phi_3 \cdot S_3 + 2I_0 \\ &- (\cos\phi_1 \cdot C_1 - \sin\phi_1 \cdot S_1 + I_0) \\ &- (\cos\phi_5 \cdot C_5 - \sin\phi_5 \cdot S_5 + I_0) \\ &= \cos\phi_3 \cdot (2C_3 + C_1 + C_5) - \sin\phi_3 \cdot (2S_3 + S_1 + S_5) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ただし、露光開始時の位相は画面ごとに正確に  $2n\pi \pm \pi/2$  ずつシフトが行われていると仮定して  $\phi_1 + (4n+1)\pi = \phi_5 - (4n+1)\pi$  とした。一方で式(3)の引数の分子は  $\sin \phi_{3\_5f}$  に強い相関を持っているがそれは同様に

$$\begin{aligned} 2I_2 - 2I_4 &= 2\cos\phi_2 \cdot C_2 - 2\sin\phi_2 \cdot S_2 + 2I_0 \\ &- 2\cos\phi_4 \cdot C_4 + 2\sin\phi_4 \cdot S_4 - 2I_0 \\ &= 2\sin\phi_3 \cdot C_2 + 2\cos\phi_3 \cdot S_2 + 2\sin\phi_3 \cdot C_4 + 2\sin\phi_3 \cdot S_4 \\ &= 2\sin\phi_3 \cdot (C_2 + C_4) + \cos\phi_3 \cdot (S_2 + S_4) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ただし、 $\phi_2 + 2n\pi + \pi/2 = \phi_4 - 2n\pi + \pi/2$  とした。このように式(4)は  $\cos \phi_{3\_5f}$  に式(5)は  $\sin \phi_{3\_5f}$  に強い相関をもつ式でありこれらはともに  $\cos \phi_3$  と  $\sin \phi_3$  の項からなる式で与えられている。そこで、相関を持つものが  $\cos \phi_{3\_5f}$  と  $\sin \phi_{3\_5f}$  であるので両式は互いに強く独立だとしこれを連立方程式として解くことにより露光時間中の光強度変化が補正された高精度な  $\cos \phi_3$ ,  $\sin \phi_3$  を求めることができると考えた。これを行うと

$$\begin{aligned} \cos\phi_3 &= \frac{[2I_3 - (I_1 + I_5)] \cdot 2(C_2 + C_4) + 2(I_2 - I_4)(2S_3 + S_1 + S_5)}{(2C_3 + C_1 + C_5) \cdot 2(C_2 + C_4) + (2S_3 + S_1 + S_5) \cdot 2(S_2 + S_4)} \\ \sin\phi_3 &= \frac{-[2I_3 - (I_1 + I_5)] \cdot 2(S_2 + S_4) + 2(I_2 - I_4)(2C_3 + C_1 + C_5)}{(2C_3 + C_1 + C_5) \cdot 2(C_2 + C_4) + (2S_3 + S_1 + S_5) \cdot 2(S_2 + S_4)} \end{aligned} \quad (6)$$

となった。これから露光開始時の位相  $\phi_3$  が求まる。

### 3.2. 実験装置

形状計測用顕微鏡は無焦点型の顕微鏡にマイケルソン型 5 倍の対物レンズ (焦点深度 16.2 $\mu\text{m}$ ) を取り付けたものである。この顕微鏡に本研究室で開発したレーザ変位計を組み込んでいる。レーザ変位計の光源には 473nm の DPSS レーザ、読み取りには高速ラインカメラ (65kHz) を使用している。垂直軸方向の走査にはストローク 100 $\mu\text{m}$  の高精度 PZT 位置決め装置 (PI 社: P-721.20) を用いた。また、外部振動による光路差変化を再現するため、PZT 位置決め装置の上に外部振動再現用のピエゾを乗せ、その上に 3 次元形状測定の対象として手持ちの鏡面を設置した。これらの PZT 位置決め装置、振動再現用ピエゾ、2 種の LED (オレンジ: 605nm, グリーン: 517nm), CCD カメラの露光開始の制御は、FPGA (Field Programable Gate Array) による高速リアルタイム処理によって行っている。

### 3.3. 制御タイミング

外部振動再現用ピエゾ素子、PZT 位置決め装置、2 色の LED の制御タイミングを図 2 に示す。測定物ステージを垂直走査しながら、

一定のシフト量毎に交互に LED を発光させて干渉画像を取り込んでいく。この時、ある高さの 1 回の露光中に疑似振動用ピエゾを用いて測定物を押し上げる。これによって外部振動によって光路差が変化した状態を再現する。

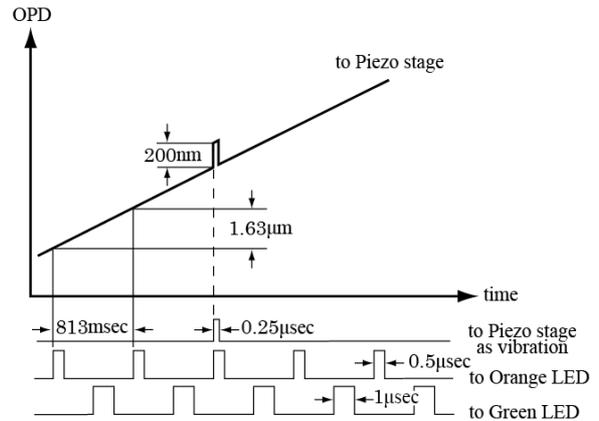


図2 装置の制御タイミング

## 4. 研究の結果

### 4.1. 実験結果

実験結果の 3 次元形状から測定対象の断面曲線を得た。断面曲線からその傾き成分を除いたものを図 3 に示す。位相シフト法では干渉画像 1 枚の異常が周囲の高さの測定にも影響を及ぼす。そのため、ピエゾ素子による疑似振動の影響を受けた領域 (0~600 $\mu\text{m}$  付近) とそうでない領域に分かれている。従来法では断面曲線が乱れており、疑似振動用ピエゾの影響を受けていることが分かる。対して提案法を用いると、断面曲線の起伏がかなり小さくなっている。

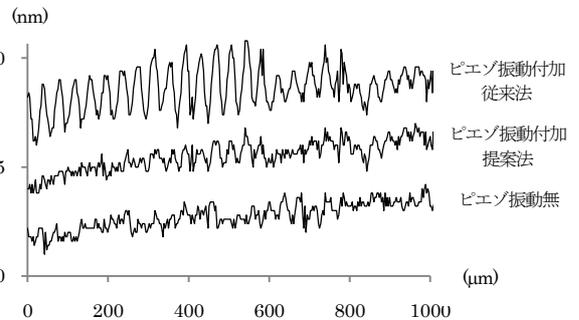


図3 傾き成分を除いた断面曲線

### 4.2. 考察

以上の結果より、長時間露光で取得した光強度から露光開始時の位相を抽出する手法は有効であることが分かった。しかしながら、提案法を用いても断面曲線の起伏を完全に消し去ることはできておらず、改善の余地があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 安達ほか, 2 個の高輝度 LED と垂直走査型干渉計を用いる高速 nm 精度形状計測, 精密工学会誌, 71, 11 (2005) 1404.
- 2) 安達, 藤本, 平野, 走査型白色干渉顕微鏡に内蔵可能な光路差変化量のリアルタイム測定法, 精密工学会誌, 74, 11 (2008) 1215.
- 3) 岩尾, 丹羽, 安達, 露光中の光路差変化情報を用いた低輝度光源干渉像からの位相抽出の高精度化, 2010 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (P.755)