

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

金沢大学 自然科学研究科 ○岩尾雄太, 丹羽康人, 安達正明

High-precision phase extraction from a long-exposure fringe images of in-coherent light utilizing optical-path-difference data changing

Kanazawa University Yuta Iwao, Yasuhito Niwa, Masaaki Adachi

We are developing a 3D-shape measurement technique using a vertical-scanning interference microscope set in a vertical-vibrating table. With OPD changing data measured by a laser displacement meter, a 2D camera is triggered to start exposure in-coherent light interference image at desired phase-shifted moments. As the in-coherent light power is usually low, exposure time is required long OPD change in the long exposure time would cause phase-shift error. Then we investigate extraction technique of phase at the start moment of long-exposure using changing OPD data

1. 研究の背景

本研究室では以前に、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¹⁾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。位相シフトを行う際に、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、形状計測の高速化を実現している。

また、振動環境下における本干渉顕微鏡の活用を考え、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、露光開始時間(LED点灯タイミング)を制御する研究²⁾も行った。この制御の為に、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軽減された。

しかし、振動環境下における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。ここで、位相抽出の精度に、露光時間の長さが与える影響について具体例を挙げて説明する。図1は干渉像中の1点における、時間に対して線形的に変化する光路差と、それに伴う光強度変化である。図1中の○が干渉画像撮影の為に干渉光を露光し始める瞬間の光強度である。垂線を引いた区間はCCD画素への露光中の区間であり、CCD画素に得られる光強度は図1中の△の露光間光強度の平均である。本来欲しい光強度は○だが、得られる光強度は△である。しかし、△から位相シフト法により得られる光強度変化の波形は図1中の点線となり、元の光強度変化に追従する。即ち、振動の無い環境では、位相抽出の精度に露光時間の長さは無関係である。ところが、図2のように光路差が振動の影響を受け、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2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。

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、露光開始時の光強度を得て、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。

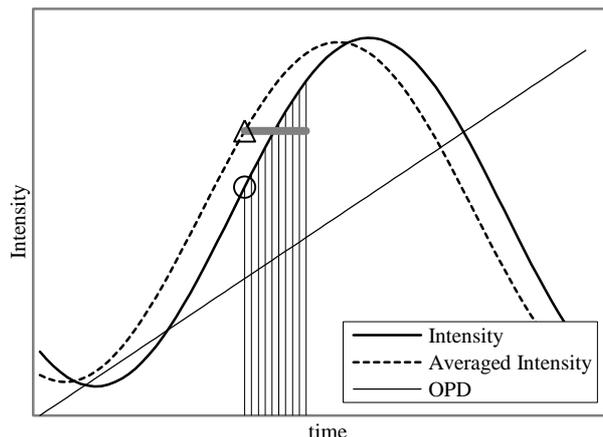


図1 垂直走査中に得られる光路差変化と光強度変化及び露光開始時の光強度(○)と長時間露光より得られる光強度(△)

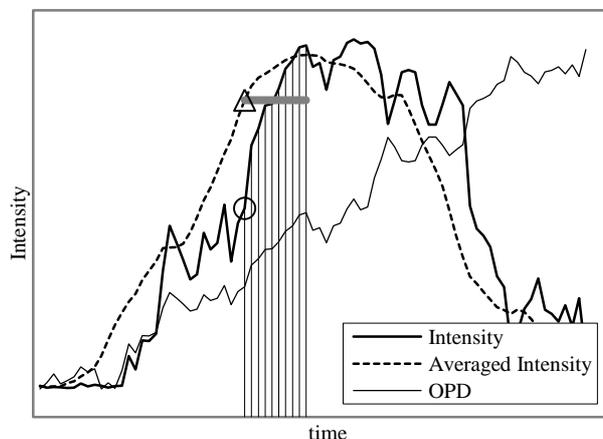


図2 振動環境下での垂直走査中に得られる光路差変化と光強度変化及び露光開始時の光強度(○)と長時間露光より得られる光強度(△)

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を露光開始時の光強度に補正することで位相抽出の精度を向上させる。この補正を行って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発信する。
2. 信号毎にLED干渉画像撮影を開始する。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. 複数の LED 干渉画像より位相シフト法による計算を行い、LED 干渉像のコントラスト、位相を求める。
4. 露光中の光路差変化情報、コントラスト、位相を用いて、LED 干渉画像の光強度を露光開始時の光強度に補正する。
5. 補正した光強度を用いて、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 2 の LED 干渉画像は長時間露光したものであり、従来の位相抽出方法である手順 3 の位相は精度が低い。手順 4 で補正した光強度を位相抽出に用いる事で高精度化する。

手順 4 での LED 露光開始時の光強度を算出する計算式の導出を以下に示す。まず、ある瞬間 t における干渉縞光強度 $I(t)$ は次式で表される。

$$I(t) = A_0 \cos\{\phi(t)\} + I_0 \quad (1)$$

A_0 はコントラスト、 $\phi(t)$ はある瞬間 t における位相、 I_0 はバイアスである。CCD カメラに撮影される光強度 I_{cam} は露光開始時間 t_0 から露光時間 Δt の間の光強度の蓄積とし、次式で表す。

$$I_{cam} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} I(t) dt \quad (2)$$

不規則な光路差変化が発生する場合、露光中の位相の変動を $\Delta\phi(t)$ とすると $\phi(t)$ は次式のようになる。

$$\phi(t) = \phi(t_0) + \Delta\phi(t) \quad (3)$$

式 (3) において $\Delta\phi(t) \ll 1$ であるとする、 $\cos\{\phi(t)\}$ は次式のようにテイラー展開できる。

$$\cos\{\phi(t)\} \doteq \cos\{\phi(t_0)\} - \sin\{\phi(t_0)\}\Delta\phi(t) - \frac{1}{2}\cos\{\phi(t_0)\}\Delta\phi(t)^2 \quad (4)$$

式 (1)、式 (2)、式 (4) より、カメラ信号は次式のようになる。

$$I_{cam} = A_0 \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \cos\{\phi(t_0)\} dt - A_0 \sin\{\phi(t_0)\} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta\phi(t) dt - \frac{A_0 \cos\{\phi(t_0)\}}{2} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta\phi(t)^2 dt + \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} I_0 dt \quad (5)$$

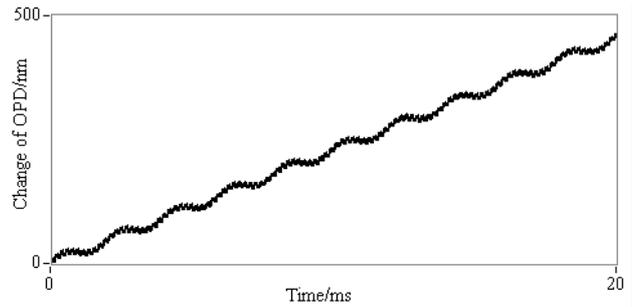
右辺の第 1 項と第 4 項の和は露光開始時の光強度を Δt 倍したものである。即ち、求めたい露光開始時の光強度は次式で求めることができる。

$$I(t_0) = \frac{1}{\Delta t} \left\{ I_{cam} + A_0 \sin\{\phi(t_0)\} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta\phi(t) dt + \frac{A_0 \cos\{\phi(t_0)\}}{2} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta\phi(t)^2 dt \right\} \quad (6)$$

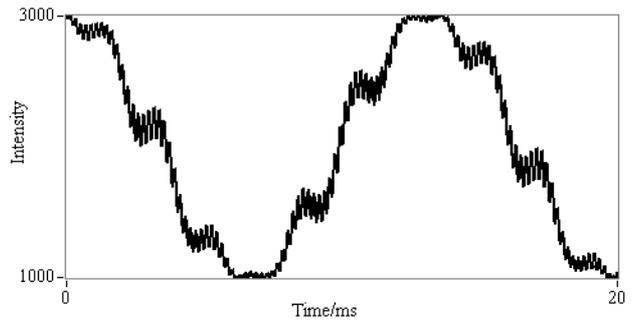
ここで A_0 、 $\phi(t_0)$ は前述の手順 3 で求めたものである。故に、これらは精度の低い値であるが、補正項であり、必要な補正はなされている。

3.2. 実験方法

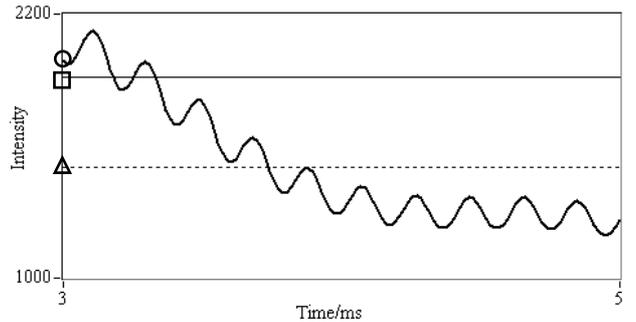
コンピュータシミュレーションで振動と垂直走査による、光路差変化、それに伴って変化する干渉画像の光強度を擬似的に生成する。それらより、一定時間の露光により取得される光強度及び露光中の光路差変化情報を用いて、露光開始時の光強度と、長時間露光より得られる光強度と、式 (6) で補正した光強度を比較する。



(a) 生成した振動と垂直走査による、光路差変化



(b) 生成した光路差変化に伴う干渉画像中 1 点における光強度変化



(c) 露光中の光強度変化及び、露光開始時の光強度 (○) と長時間露光より得られる光強度 (Δ) と式 (6) で補正した光強度 (□)

図 3 光路差変化及び光強度変化を擬似的に生成した場合のシミュレーション結果

4. 研究の結果

4.1. 実験結果

図 3 の (a) が生成した振動と垂直走査による、光路差変化である。(b) が光路差変化に伴った、干渉画像中のある 1 点における光強度変化である。そして (c) は (b) の露光時間中の拡大図で、図中○は露光開始時の光強度、図中△が一定時間の露光により取得される光強度、図中□が式 (6) で補正した光強度である。図より分かるように、補正後は露光開始時の光強度に近づいていることが分かる。

4.2. 考察

以上の結果より、長時間露光より取得した光強度を、露光開始時の光強度に補正する手法は有効であることが分かった。この方法を用いた位相抽出は高精度化されると考える。

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.