

## 顕微鏡内蔵型レーザ変位計の開発

金沢大学 安達正明, ○平野勇輝, 藤本健太, 泉澤俊裕 立山マシン株式会社 五十島一興

Development of Built-in Laser Displacement Meter for Microscope  
 Kanazawa University Masaaki ADACHI, Yuki HIRANO, Kenta FUJIMOTO, Toshihiro SENZAWA,  
 Tateyama Machine Co.,LTD. Kazuoki ISOJIMA

Optical path difference (OPD) plays an important role in white light interferometers (WLI) and should be shifted in a prescribed way. The rigidity of the amounts to be shifted has left WLIs unapplied to measurement under physically unstable environments. We develop a high-speed laser displacement meter which could be embedded in WLIs. OPD is measured with the laser displacement meter in real-time. Each time the OPD reaches due values, the displacement meter outputs trigger signals, in response to which the camera and the light source of the WLI are activated. The white light interference patterns acquired in this way are expected to be processed to yield the 3D profile of the measuring object.

### 1. 研究の目的・意義

代表的な非接触 3 次元形状測定装置の一つに光干渉を利用する白色干渉顕微鏡がある。この顕微鏡では、物体光と参照光がつくる干渉画像を処理して得られる試料表面の各部分の位相と、光路差の変更量を用いて形状測定を行う。各部分の位相を知るためには、所定の光路差変更毎に干渉画像を多数枚取得する必要がある。

通常、光路差の変更量は測定面か参照面に取付けたアクチュエータへの指令値からしか知ることができない。そのため、既存の白色干渉顕微鏡では、測定面に外部振動が加わった場合や、指令値の分解レベルが低い場合には測定誤差が増える。

光路差変更量が正確にわかりさえすれば、このような場合でも精度よく形状測定を行うことができる。このようなことを実現するためにレーザ変位計を外付けする方法が考えられる。白色干渉顕微鏡による形状測定時の光路差変更量は数  $\mu\text{m}$  以下であり、その誤差は数  $\text{nm}$  程度でなければならないが、レーザ光干渉を利用すればこの要求をみたすことができる。レーザ変位計で光路差変化を直接測定して、所定量だけ変化したときに画像取込み指令を顕微鏡に送ればよい。

しかし、外付けでは、白色光源の光軸とレーザ変位計の光軸に数  $\text{cm}$  の距離ができてしまい、誤差が大きくなりやすい。たとえば、二つの光軸の間に  $5\text{cm}$  の距離があったとき、振動による構造のたわみなどで測定面が  $10^{-6}\text{rad}$  傾いただけでも光路差の誤差が  $10\text{nm}$  に及んでしまう。

この問題を解決し、光路差変化を直接測定するには、レーザ変位計と顕微鏡の光軸を一致させればよい。現在までにシフト量を計測しながら 3 次元形状測定を行う方法を考案したという報告は何件かなされているが、いずれも測定面を移動させるステージなどにミラーを装着する方法をとっているか<sup>1,2)</sup>、プリズムなどの光学部品が顕微鏡への組込みを困難にすると思われるような光学系を使う<sup>3)</sup>。白色光源と同じ光路を使って直接光路差のシフト量を計測しようとする報告はなされていない。そこで我々は、振動下でも形状測定可能な干渉顕微鏡の開発の前段階として、白色光源と光軸の一致が可能な、リアルタイム性のあるレーザ変位計の開発を試みた。その結果を述べる。

### 2. 研究の方法

#### 2.1 実験装置

実験装置の光学系はマイケルソン型で、ビームの光路が顕微鏡の白色光の光路になるべく一致するように設計した。実験装置の概略を図 1 に示す。試料を載せたテーブルはモータにより上下に動かすことができ、これにより光路差を変化させる。実験では試料に鏡面を用い、テーブルは一方方向に動かす。ビームスプリッタで光束を物体光と参照光に分け、両者の反射光を干渉させる。光路差の変化とともに干渉縞が変化し、この干渉縞を CCD 高速ラインカメラで撮影する。撮影された干渉画像を図 2 に示す。その後、干渉画像を FPGA(Field Programmable Gate Array)ボードに直接取込ませて、こちらで

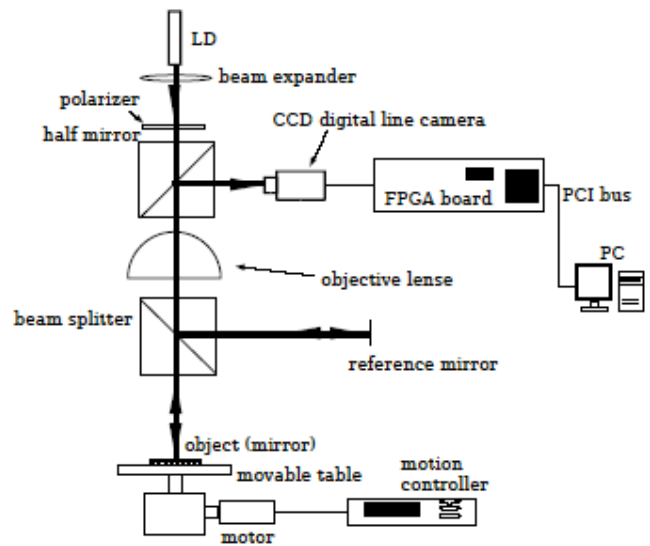


図 1 実験装置概略

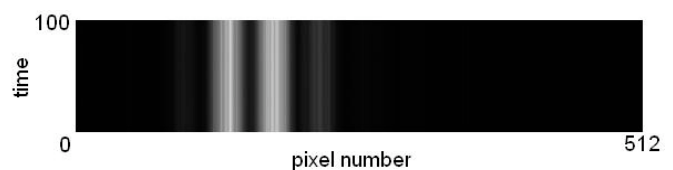


図 2 取込み干渉縞(複数の画面を縦方向に並べてある)

位相の変化を一画面取込み毎に算出する。

## 2.2 変位計算方法

変位は規格化という作業を2回行うことで算出する。干渉光強度  $I$  はバイアス  $I'$  とコントラスト  $I''$  に分解することができる。干渉光強度の時間的変化における最大値を  $I_{\max}$ 、最小値を  $I_{\min}$  とすると、規格化された干渉光強度  $\bar{I}$  は、

$$\bar{I} = \frac{I - I'}{I''} = \frac{I - (I_{\max} + I_{\min})/2}{(I_{\max} - I_{\min})/2} = \cos\{\phi(x, y) + kt\} \quad (1)$$

となる。位相の  $\phi$  は空間的に定まり、 $kt$  はテーブルの移動により時間的に変化する。次に空間的に異なる2点を選び、そこでの干渉光強度を上式で規格化したものをそれぞれ  $\bar{I}(\phi)$ 、 $\bar{I}(\phi')$  とし、

$$I_s = \bar{I}(\phi) - \bar{I}(\phi'), \quad I_c = \bar{I}(\phi) + \bar{I}(\phi')$$

というように  $I_s$  と  $I_c$  を定め、この二つをさらに規格化したものを  $\bar{I}_s$ 、 $\bar{I}_c$  とすると、次式が成立する。

$$\frac{\phi + \phi'}{2} + kt = \tan^{-1}\left(\frac{-\bar{I}_s}{\bar{I}_c}\right) \quad (2)$$

$(\phi + \phi')/2$  は定数なので、ある光路差での干渉光強度の位相  $kt$  を算出することができる。この計算方法には処理が軽く、試料の移動方向の反転にも対応できるなどの利点がある。

## 3. 研究の結果とその意味

図1の実験装置を用いて実際に変位を測定した。変位計算に使う干渉光強度は、ラインカメラの複数の画素の合計値を用いる。このようにすることでSNRを改善できる。ラインカメラ上の各画素に入射する干渉光の強度を図3に示す。縦線は実験で使用した画素グループの位置を示している。第一グループの画素は156, 157, 158, 159, 160, 161番目の6個であり、第二グループの画素は166, 167, 168, 169, 170, 171番目の6個である。テーブルを動かしたときの干渉光強度のグループ別の合計の変化は図4のようになる。

この干渉光強度に対して2.2で述べた演算をFPGAボードを用いて行う。ラインカメラの画素数は512でラインレートは58kHz、テーブルの移動速度は5  $\mu$ m/s、対物レンズの倍率は5倍、半導体レーザーの波長は473nmである。測定はリアルタイムに行われ、結果はFPGAボード上のメモリに保存される。この位相測定結果を図5に示す。このグラフはテーブル移動量86  $\mu$ m (移動時間は17.3sec)の測定結果に相当する。

所定の光路差変更毎に顕微鏡に画像取込みタイミングを伝えるための、FPGAボードからの外部信号出力を行えることも確認した。

## 4. 結言

干渉顕微鏡内臓型レーザー変位計を組立て、それを用いてリアルタイムに位相変更量を測定できることを確認した。測定誤差をより少なくしていくことが今後の課題である。

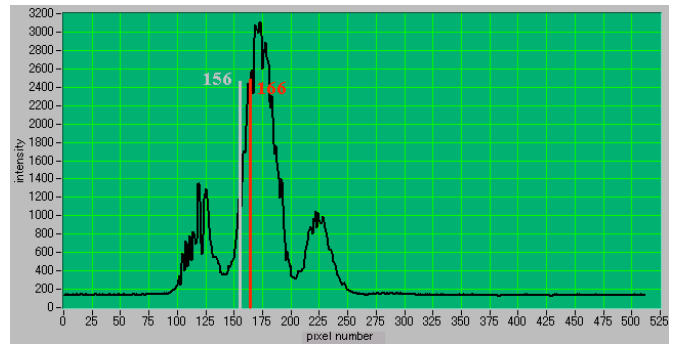


図3 各画素の光強度

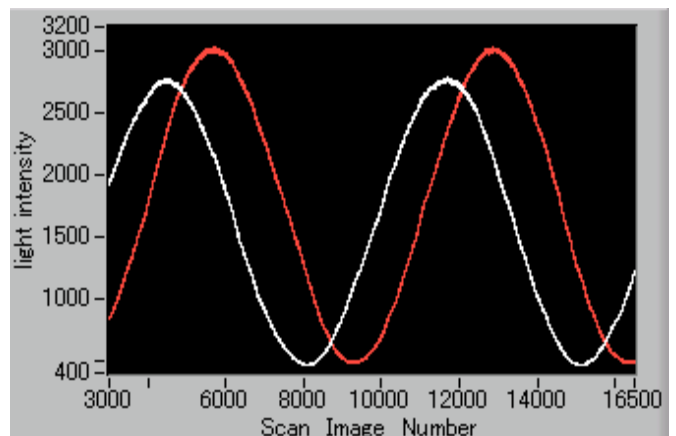


図4 干渉光強度の変化

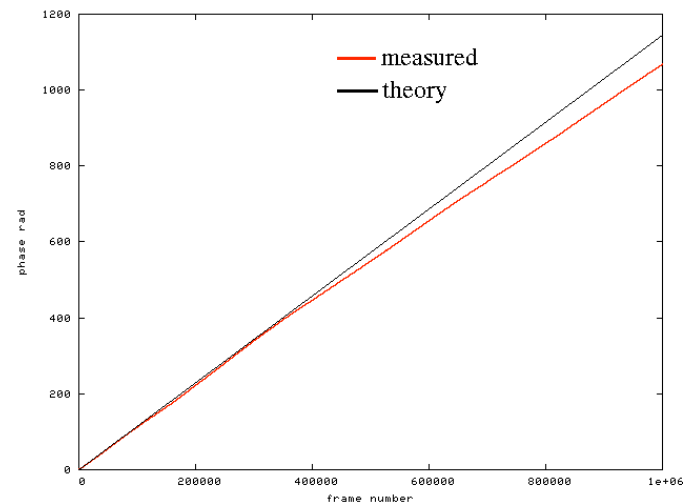


図5 位相変更量の測定結果

## 参考文献

- 1 S. Kiyono, et al: Self-calibration of a scanning white light interference microscope, Opt. Eng. 39(10), 2720-2725 (2000)
- 2 A. Olszak, et al: High-stability white-light interferometry with reference signal for real-time correction of scanning errors, Opt. Eng. 42(1), 54-59(2003)
- 3 高橋康英, 他 1998: ヘテロダイン干渉法による動的変位量の測定, 精密工学会誌, 64 (8), 1132 (1998)