

## 二波長光干渉式高速三次元形状測定法における精度評価

金沢大学工学部 ○安達 正明, 上田 覚司

Measuring Accuracy of the High-speed Vertical scanning Profilometry having Two Light Sources

Faculty of Engineering, Kanazawa University Masaaki ADACHI, Kakuji UEDA

The numerical aperture (N.A.) of a microscope objective affects the measurement of surface profiles. Large N.A. objectives measure smaller heights than the actual values. We here report a calibration process of N.A. effects in our high-speed vertical scanning profilometry having two light sources. After this process the heights measured by our profilometry for the VLSI step height standard coincide with the certified value.

### 1. 研究の目的

高精度な加工面の形状評価にはフィゾー干渉計を利用した光干渉測定が広く利用されている。抽出した位相値と光の波長から光路差情報を介して形状評価をするものであり、光の波長が正しく反射による位相の飛び<sup>1)</sup>を無視できるならば、測定に殆ど誤差は生じない。しかし、超精密加工部品の形状評価には横方向にも拡大機能を有する顕微干渉計を用いる場合が多い。この場合は拡大対物レンズのNAが影響して、測定される位相変化量と高さ変化量には平行光線を用いたフィゾー干渉計と異なる関係が発生し、簡単な計算のみで高さは導け出せない<sup>2)</sup>。このため、顕微干渉計を用いる高精度形状測定においては、測定精度の評価は重要である。

我々はこれまで「二種類の広帯域波長光源を組み込んだ垂直走査型干渉計を用いる高速形状計測法」を研究してきた<sup>3)</sup>。今回は上に述べたように対物レンズのNAの影響により光源の波長のみからは正確な高さの計算は出来ないとし、実際に使える実効波長（フィゾー干渉計等のように用いることのできる）を垂直走査ピエゾの移動精度が正しいと仮定して評価して、形状測定を行ったので報告する。

### 2. 二波長光干渉式高速三次元形状測定法の原理

用いている測定法は垂直走査型白色干渉法<sup>4)</sup>と測定原理が同じである。白色の光を用いた干渉では光路差ゼロ付近すべての波長の干渉縞が重なるためモジュレーションが最大となり、光路差がずれるに従い減少する。そこで検査物体（もしくは参照面付き対物レンズ）の位置を光軸に沿って平均波長の1/8倍（反射型なので位相シフト量では $\pi/2$ ）ずつ一方方向にステップ移動させながら干渉画像を連続して取込む。そしてモジュレーション最大の画像を探し出し、その画像の番号と位相から光路差ゼロの位置を抽出する。しかし、この方法では位相シフト量が $\pi/2$ であるため、画面取込当たりの移動量は $0.1 \mu$ 以下と短く、移動速度の高速化はこのままでは難しい。

我々がこれまで研究してきた二波長光干渉式高速三次元形状測定器の光学系を図1に示す。干渉長の短い中心波長 $\lambda_1$ と $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ )を持つ2つの光源を利用して、中心波長 $\lambda_1$ での位相シフト量を $6\pi + \pi/2$ 前後、中心波長 $\lambda_2$ では $6\pi - \pi/2$ 前後となるようにし位相シフト（一定距離ステップ移動）を行う。図2のタイムチャートに示すように交互に光源を点滅させて干渉画像を撮像する。そして波長 $\lambda_1$ のモジュレーションより光路差ゼロ付近の画像番号を探し出し、その画像の位相とその画像に隣接する波長

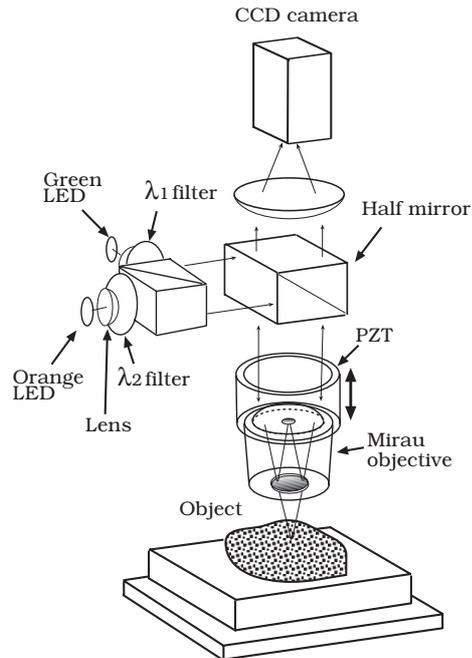


図1 二波長光干渉式高速三次元測定,  $\lambda_1=492.4\text{nm}$ であり,  $\lambda_2=592.1\text{nm}$ である。

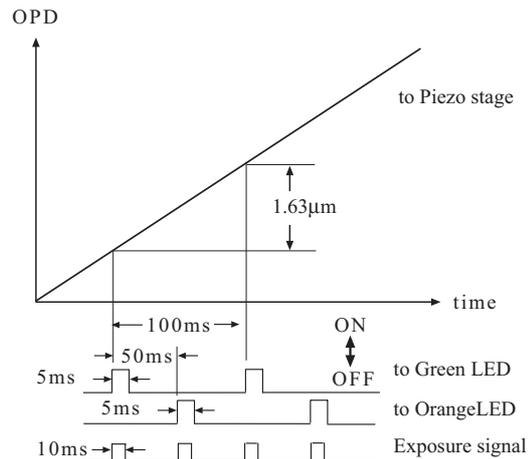


図2 発光と画像取込のタイムチャート

$\lambda_2$ の画像の位相から位相差を計算する。そして2波長が作る等価波長と組み合わせて干渉縞の次数を決定し、最終的に画像番号やステップ移動量と合わせて高さを計算する。

### 3. 二波長光干渉方式での実効波長の決定

顕微干渉では先に述べたように、拡大干渉対物レンズのNAが影響し、 $\{(\text{波長} \times \text{位相変化量} / 2\pi) / (\text{高さ移動量} \times 2)\}$ は1以下となる。これは図3に示すように光がレン

ズを通ることによって反射面に収束するように入射することから生じる。結果として、高さ移動量と位相変化量の関係を与える（高さ計算に使用できる）実効波長が用いた波長より長くなる。しかし、二波長光干渉方式では干渉対物レンズを高精度な1nmの分解能を有するPZTで駆動している。そこで、この移動量が正しいとしてステップ移動の前後での位相の変化量から実効波長を求めることにした。

今、PZTを波長 $\lambda_1$ での干渉光強度変化が3.25周期（位相では $6\pi + \pi/2$ ）前後に相当する長さだけステップ的に移動させながら各点で光強度変化を取り込むと、モジュレーション最大付近では図4の●に見られる変化となる。この変化から以下の式で $k=i$ 番目と $i+1$ 番目の位相を求める。

$$\phi_k = \arg\left(2i \sin(\alpha) \left[7(I_{k-1} - I_{k+1}) - (I_{k-3} - I_{k+3})\right] + 4[1 + \sin^2(\alpha)](2I_k - I_{k-2} - I_{k+2})\right) \quad (1)$$

そして、決まっているPZTステップ移動量に対して実効波長の数値をゆっくり変えながら、(1)による $i$ 番目と $i+1$ 番目の位相の差を計算し、それがPZT移動量と実効波長から単純に計算される位相変化量と一致するとして実効波長を探した。

4. 実験

実際に10倍の対物レンズ(NA=0.3)を用いて取り込んだ干渉光強度の変化から上の方法で実効波長を求めた。その結果、位相の一致度を $0.005 \times 2\pi$ 前後に調整できた。これ以上には画像に含まれる雑音、短干渉長より来るモジュレーションの減衰などにより、個々の画素で位相の変化量はばらつき改善が難しかった。しかし、この数値は0.005波長/3.25波長の精度に相当し、波長を1/600の精度で決定できたことを意味する。この精度はPZTの移動精度とほぼ同じオーダーである。このようにして得られた実効波長は、用いた $\lambda_1$ の492.4nmに対して501.8nm、 $\lambda_2$ の592.1nmに対して596.4nmとなった。次にこれらを用いた標準段差試料の測定を行った。得られた結果を図5と6に示す。標準段差は添付資料によると $84.9 \pm 1.1\text{nm}$ であり、測定結果は85.3nmとなり、述べた波長決定法が有効であることを示した。またこの装置でベアリング球を測定した結果を図7に示す。

5. 結論

PZTの移動量が正しいとし、位相変化量と実効波長から算出される移動量がPZT移動量に一致するとして実効波長を算出した。その実効波長を用いた結果、ほぼ正しく形状測定が出来た。

参考文献

1. T.Do, K. Toyoda, and Y.Tanimura, "Effects of phase changes on reflection and theirwavelength dependence in optical profilometry" ,Appl. Opt. 36,28,7157,1997
2. K.Creath, " Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives" , Appl. Opt., 28, 15,3333, 1989
3. 安達, 稲部, 2種類の広帯域波長光源組み込み垂直走査型干渉計を用いる高精度形状計測(その2), 2002年度精密工学会春季大会講演論文集 760P
4. K.G.Larkin"Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry" ,J. O. S. A.A, 13,4, 832 (1996).

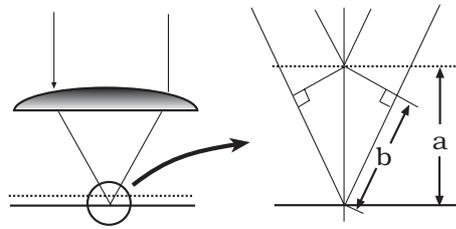


図3 干渉対物レンズ下での光線の進行方向.  $a > b$ となり、これがNA効果を与える

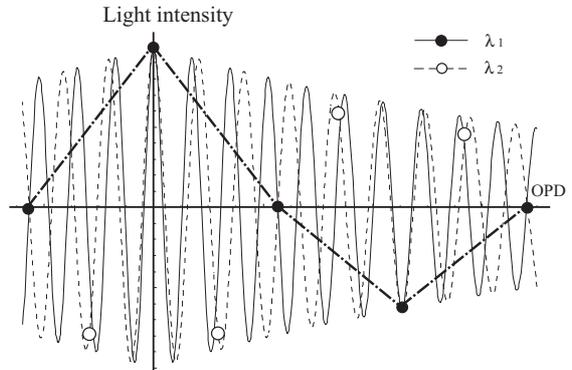


図4 取込光強度の変化実際に測定される点は●や○の点のみである。

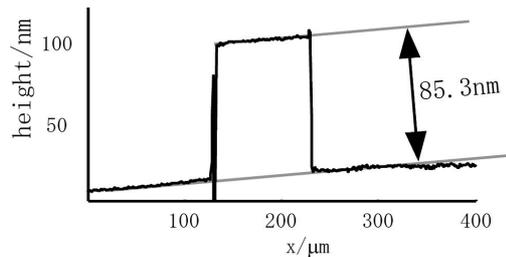


図5 標準段差試料の断面測定形状結果

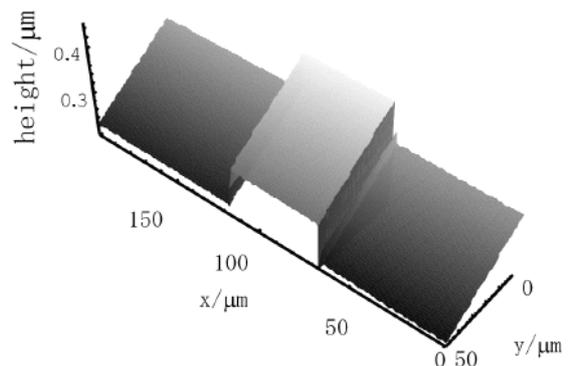


図6 標準段差試料の3次元形状測定結果

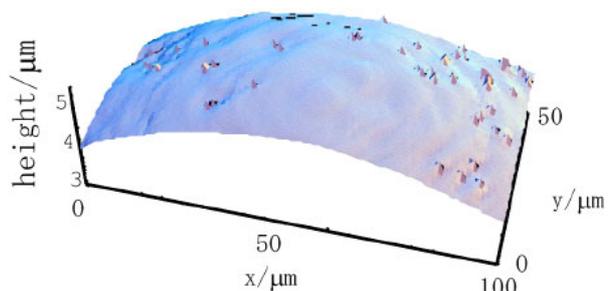


図7 ベアリング面の3次元形状測定結果