

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*

安達 正明** 上田 覚児*** 榎 本文彦†

High-speed Nanometric-precision Profilometry using Vertical Scanning Interferometry and Two high-power LED

Masaaki ADACHI, Kakuji UEDA and Fumihiko ENOMOTO

We propose a high-speed vertical scanning profilometry which has nanometric height precision. The proposed profilometry is equipped with two short-coherent-light sources, which are made of extremely-high-power light emitting diodes (LED). In 3-D profile measurements, the profilometry acquires many interferograms while vertically scanning a Mirau-type objective with 0.407- μm movement/interferogram and alternately-flashing LED. Odd-numbered interferograms are acquired with 503-nm LED and even-numbered interferograms are with 591-nm LED. Regarding the acquired interferograms, a computer calculates phase and modulation contrast using a phase-shifting technique. As two movements are repeated between acquisitions of the same-color interferograms, phase step corresponds to approximately $6\pi + \pi/2$ with 503 nm and approximately $6\pi - \pi/2$ with 591 nm, respectively. After searching the interferogram having a contrast peak, the computer extracts optical path difference of the searched interferogram with nanometric resolution from the phase information. From the vertical movement length of 0.407 μm and a frame rate of 111 Hz, a vertical scanning speed is given as 45.2 $\mu\text{m}/\text{s}$. Nanometric height precision of the profilometry is checked using the measured data of a step height standard.

Key words: white light interferometry, profilometry, phase shift, vertical scanning, LED, nanometer, two wavelengths

1. 結 言

超精密部品の3次元形状検査には、nm(ナノメートル)の分解能を持つ光干渉応用形状測定器が広く用いられている^{1~3)}。原子間力顕微鏡など走査型顕微鏡が優れた横分解能から近年注目されているが、使用に際しては測定部位を小さく切り出す必要があるなど製造プロセスの中間部品検査での利用はまだ難しい。光干渉を用いる方法は横方向の走査型でないため数十nmレベルの振動振幅下であれば周辺に対する相対高さを、サブnmの分解能で広域計測でき、必ずしも切り出す必要もない。このため、部品の全数検査等には向いており、将来的にも走査型顕微鏡との共存状態は続くと思われる。

光干渉を用いる装置では検査面と参照面(鏡面)が作る干渉像から干渉位相を抽出して形状を算出する。位相抽出に広く使われるのは位相シフト法である。位相シフト法では光の波長 λ の1/4倍(もしくは1/3倍)ずつ光路差を段階的に変えながら干渉画像を複数枚取り込み、画像データ間の演算から位相を抽出する。抽出された位相は $-\pi$ から π の間の数値で与えられ、凹凸が極めて小さく位相が画像内の総ての点で $-\pi$ と π の間に余裕を持って収まるならば、位相は $(\lambda/2\pi)$ 倍され光路差が計算され、さらに1/2倍され形状が求められる。

しかし凹凸が λ の1/2倍以下(反射型を想定するので位相は $-\pi$ から π)に収まることはまれであり、収まらない場合は面内での位相が、どこかで $-\pi$ から π (もしくはその逆)へ不連続にジャンプする。検査面が滑らかである場合、このジャンプは位相抽出過程で計算上発生する実体を伴わないジャンプであるとし、ジャンプした一方から 2π を引き(もしくは加

え)、位相が連続変化するように補正して形状が計算される(アンラップ処理)。このような処理は抽出位相から形状計算を行う時は不可欠であったため、これまでアンラップ処理に関する研究が広く行われてもきた⁴⁾。

検査面に段差が含まれるようになると、水平方向の連続性は成り立たずアンラップ処理ができなくなる。MEMS(micro electromechanical systems)デバイスの検査など最近広く扱われる精密加工面はこの場合が極めて多く、このことは現在急速に広がりつつある白色干渉を用いる形状測定へと手法を変えさせた。

白色干渉を用いる形状測定では、位相と共に干渉縞のコントラストも利用して形状を評価する^{1~3)}。検査面(もしくは参照面を組み込んだ対物レンズ)を光軸方向にゆっくりと動かしながら(Z軸走査と呼ぶ)白色による干渉光強度を連続して読みとると、光路差変化に伴う干渉縞のコントラストは光路差ゼロでピークとなる。このピーク位置は干渉像を読み取るカメラの画素毎に独立して与えられるために、横方向の形状連続性を用いることなく高さ測定が可能となる。取込に時間が掛かるので画像枚数を少なくしたいが測定精度は落としたいくない。そこでコントラストがピーク付近と認識された画像の番号とその画像での位相を用い、段差形状を位相シフト法と同じ精度で測定する²⁵⁾。だが、ピーク位置に最も近い画像の番号とその位相を高精度に抽出するためにはZ軸走査による位相シフト量を一般に $\pi/2$ 前後として、画像を取り込む必要がある。画像は2次元データであり取込にどうしても時間を要する(通常のカメらは1/30秒)。このため凹凸が深いとその高低差を上回る範囲をZ軸走査する必要があり、 $\pi/2$ でも短くない走査時間と大容量のメモリを必要としている。

一方、位相シフト法を用いなくて高精度に段差等が測定可能な優れた方法として、 $\pi/2$ 前後の位相変更毎に白色干渉画像を多数枚取り込むが、FFT(Fast Fourier Transformation)を応用

* 原稿受付 平成17年1月14日

** 正会員 金沢大学大学院(金沢市小立野2-40-20)

*** (株)PFU(石川県かほく市宇野気ヌ98-2)

† 金沢大学大学院

して、位相傾斜（位相変化/周波数変化）から光路差情報を高精度に抽出する方法がある¹⁾⁶⁾。この方法も3次元形状をnmの分解能で測定でき、メモリを効率的に用いて形状計算速度も遅くはない。現在、深い凹凸を持つ加工面形状の高精度評価はこの方法を組み込んだ装置¹⁾の利用がかなり進んでいるようである。

全く干渉を用いないで形状を測定するにはレーザ共焦点顕微鏡が利用できることも広く知られている。段差等の3次元形状測定用にレーザ共焦点顕微鏡を改良し、CCDカメラとマイクロレンズアレイを組み込んで高精度化と高速化を可能にした製品も発表されている⁷⁾。また、画素毎に得られる干渉コントラスト信号をナイキストサンプリング定理から決められる最長間隔以上の間隔でサンプリングし、帯域通過型標準化定理を応用してコントラスト最大点を求め、形状を高速で計算する製品も最近発表されている⁸⁾。これらの方法は極めて速く形状測定できる方法であり、ユニークな方法として注目される。しかし、測定分解能に関しては位相シフト法やFFTを用いる方法にかなり劣っている。

本研究では、中心波長の異なる2種類の高輝度LEDを使った垂直走査型干渉計による高精度形状計測法を新しく提案している。この方法は極めて速い走査速度を持つレーザ共焦点や帯域通過型標準化定理を応用する方法には速度で劣る。しかし、測定分解能に関しては位相シフト法やFFTを用いる方法と同じレベルを実現し、他方において大きな光路差変更間隔（各波長での位相シフト量は $6\pi \pm \pi/2$ ）で画像をサンプリングして位相を計測しているため、Z軸走査速度は従来法（ $\pi/2$ の位相シフト量を用いる方法）に比べ6倍近い（シフト量は約12倍だが2種類の画像を取り込むため）。

製造プロセスでの全数検査では測定精度と測定速度が重要である。本方法は、nmの分解能に相当する位相抽出精度とZ軸走査部の高精度位置決め機能を活かすZ軸走査型形状測定法では、現在最も走査速度の速い方法と我々は考える。実験では $45\mu\text{m/s}$ の垂直走査速度で標準段差試料を測定し、測定誤差がナノメートル以下であることを確認している。

2. 測定原理

本研究では0.1mm近くまでの深い凹凸や段差を有する加工面の高速高精度形状計測法の開発を目的としている。そこで、拡大干渉画像の取込と0.1mmの高精度Z軸走査を簡単に実現するため、干渉顕微鏡を利用し、参照面を内部に持つミロー対物レンズをPZTでZ軸走査する方式を用いた（図1）。ミロー対物を走査する方法はレンズとレンズに固定された参照面を検査面に対し相対的に移動させるので、ピントが最もあった状態で干渉コントラストを最大にでき、縦横共に高分解能な測定が行い得る。この光学系での干渉画像をCCDカメラを用いて一定の光路差変更毎に多数枚取り込み、演算処理することを前提にして、以下に提案方法の測定原理を述べる。

2.1 干渉コントラストと位相の高速測定

2.1.1 コントラスト情報の高速取得と計算

白色光などの広帯域スペクトル光を用いると干渉長を短くでき、干渉する2つの経路の光路差情報を干渉縞のコントラストから精度良く求めることができる。しかし干渉光強度は図2に示すように波長 λ の周期で正弦波的变化を繰り返すので、正確なコントラストの情報を取得するためには光強度のサンプリ

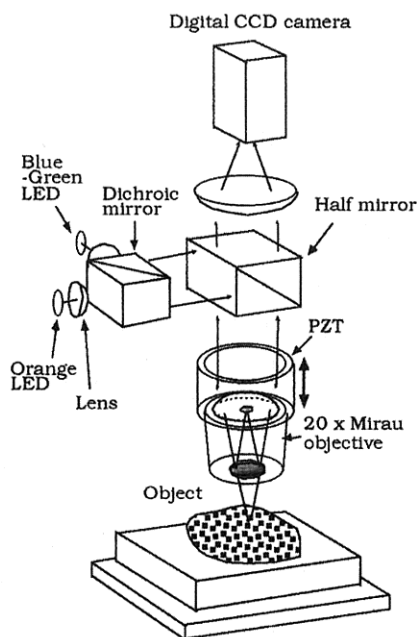


Fig.1 An optical layout of the proposed interferometry. Two extremely-high-power LED alternately emit their color light. A monochrome CCD camera acquires interferograms synchronously with the LED emissions

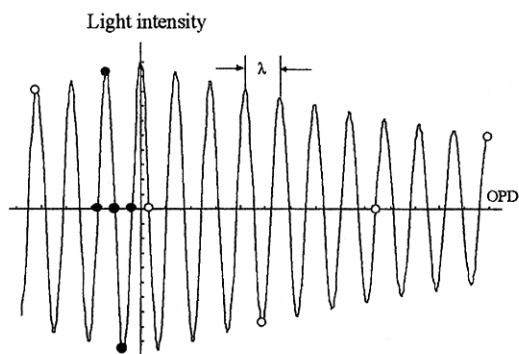


Fig.2 Interference-intensity changes along optical path difference (OPD). Black circles show an example of sampling points using widely used $\pi/2$ phase step. White circles show that of sampling points using $6\pi + \pi/2$

ングは1周期中に最低で2個、任意のサンプリング開始点を考えると3個以上は必要であり、できれば図の●のように4個が望ましい。一方でCCDカメラの画像は縦、横500画素前後の膨大なデータからなるので、1画面の取込には通常1/30秒必要とする。2つの条件から3個/1周期のサンプリングでも光路差変化速度は $(\lambda/3\text{個}) \times (30\text{個/秒}) = 10\lambda/\text{秒}$ となり、金属面等の反射型では垂直走査の速度は光路差変化速度の1/2倍だから、 λ を $0.6\mu\text{m}$ とすると走査速度は $3.0\mu\text{m/秒}$ となる。これでは0.1mmの凹凸走査に33秒、また画像メモリは1点のデータを1byteとしても $(1/4)\text{M byte} \times 990\text{枚} = 250\text{M byte}$ 必要となり、凹凸が深くなるとこの数値に比例して演算時間やメモリ容量も必要となる。

我々はそこで図2の○に示すように、位相変化が $2n\pi \pm \pi/2$ (n は自然数。図の位相変化は $6\pi + \pi/2$)の点で光強度をサンプリングすることにした。干渉光強度が 2π の周期を持つならば、サンプリング間隔を $\pi/2$ から $2n\pi \pm \pi/2$ にしてもコントラスト分布の計算に大きな誤差は入り込まないからである。一方で位相変化の速度は $\pi/2$ に比べ $4n \pm 1$ 倍になる。この時、 $\alpha = 2n\pi \pm \pi/2$ のシフトで取得される

干渉光強度 I は次式となる。

$$\begin{aligned}
 I_{i-3}(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_{i-3}(x,y)\cos\{\phi_i(x,y) - 3\alpha\}], \\
 I_{i-2}(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_{i-2}(x,y)\cos\{\phi_i(x,y) - 2\alpha\}], \\
 I_{i-1}(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_{i-1}(x,y)\cos\{\phi_i(x,y) - \alpha\}], \\
 I_i(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_i(x,y)\cos\phi_i(x,y)], \\
 I_{i+1}(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_{i+1}(x,y)\cos\{\phi_i(x,y) + \alpha\}], \\
 I_{i+2}(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_{i+2}(x,y)\cos\{\phi_i(x,y) + 2\alpha\}], \\
 I_{i+3}(x,y) &= I_0(x,y)[1 + V_{i+3}(x,y)\cos\{\phi_i(x,y) + 3\alpha\}],
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 I の添え字 i は垂直走査中に取り込む画像の番号で整数、 $\phi(x,y)$ は I 取り込み時の位相、 $V_i(x,y)$ は I_i のコントラストである。コントラストは光路差ゼロ付近の画像では大きく、ずれると小さな値となる。しかし、コントラスト情報の計算では次の大胆な近似をここでは用いる（なぜなら正確な取り扱いが議論を複雑にする。一方で、最終的な形状計算には最大コントラストを持つ画像の番号が1もしくは2ずれても影響しないから）。この近似とは、式(2)をコントラストの計算に使うことである。この式が正しく成立するためには $V_{i+j}(x,y) = V_i(x,y)$ ($j = \pm 1, \pm 2, \pm 3$) が満たされなくてはならない。

$$V_i = \frac{1}{16\sin^2(\alpha)\{1 + \sin^2(\alpha)\}I_0} \left[4\sin^2(\alpha)\{7(I_{i-1} - I_{i+1}) - (I_{i-3} - I_{i+3})\}^2 + [1 + \sin^2(\alpha)]^2(8I_i - 4I_{i-2} - 4I_{i+2})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式(2)以降では、画素の位置を示す (x,y) は表現を簡単にするため省く。式(2)から得られるコントラスト V_i が最大となる i をその画素で光路差が最もゼロに近い画像の番号 k とする。

2.1.2 位相の高速測定

コントラストが最も大きい画像の番号 k を用いて前後7枚の画像から、 k 取り込み時の位相 ϕ_k を式(3)で求める。この位相計算式の信号対雑音比は3画面や4画面、そして5画面⁹⁾を用いる測定法に対し高いことが報告されている¹⁰⁾。

$$\phi_k = \arg \left[2i\sin(\alpha)\{7(I_{k-1} - I_{k+1}) - (I_{k-3} - I_{k+3})\} + [1 + \sin^2(\alpha)](8I_k - 4I_{k-2} - 4I_{k+2}) \right] \quad (3)$$

繰り返しになるが式(3)で用いる干渉画像 I はコントラストが大きくピントも合っている画像番号 k を中心とする画像であり、計算される位相 ϕ_k は用いる画像のS/Nの点でも精度は高い。 k 取込時の光路差と式(3)で得られる位相との関係は一般的な位相シフト量 $\pi/2$ で4画面を用いる場合と同じく図3の破線や点線のようになることが数値計算から確認できる。

2.2 2色の光での位相値からの形状計算

2.1の方法で干渉コントラストが大きい画像番号 k とその画像取込時の位相 ϕ_k が測定できる。しかし、位相シフト量 α は高速測定を実現するために $2n\pi \pm \pi/2$ となっている。故に求めた位相は図3の○の ϕ_k でなく●の ϕ'_k の可能性もある (ϕ_k と ϕ'_k は光路差が波長だけ異なるが同じ位相を持つ)。加

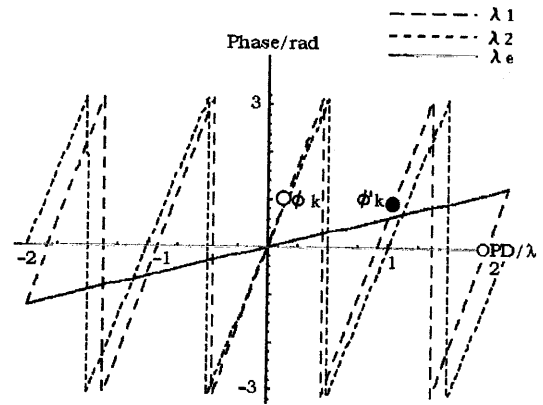


Fig.3 OPD dependence of phases ϕ_i measured with the light of wavelengths λ_1, λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$), and OPD dependence of their difference $\Delta\phi$. The latter is same as the phase measured with equivalence wavelength λ_e .

えて式(2)の近似のため k には誤差が含まれている可能性も高い。故に1色の光を用いた高速測定からは、検査面の高さ（垂直走査での光路差ゼロになる時点）を正確に求めることはかなり難しい¹¹⁾。

そこで、2色の光（2種類の広帯域スペクトル光）を用いる。すなわち λ_1 を中心とする広帯域スペクトル光と λ_2 を中心とする広帯域スペクトル光を交互に点灯させ、各波長別に式(1)の光強度を取込み、2種類の波長での位相を式(3)で抽出し両者の位相差から光路差を計算する。

いま λ_1 の光の画像番号 k での式(3)を用いての位相測定値を ϕ_k^1 、直後に取り込まれる λ_2 の画像での位相測定値を ϕ_k^2 とする。 ϕ_k^2 は波長が ϕ_k^1 と違うために図3の点線のようになる。ここで両者が共に同じ光路差に対して抽出されるとした時、その差 $\Delta\phi_k = \text{MOD}[(\phi_k^1 - \phi_k^2), 2\pi]$ （ここでMODは剰余を意味する）は、図3の実線が示すように λ_1 と λ_2 が作る等価波長 $(\lambda_e = \lambda_1 \times \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1))$ を用いてその光路差を測定した時の位相となる。波長の差の選び方により、この等価波長 λ_e は λ_1 の5倍や10倍前後に容易に設定できる。故に位相シフト時に λ_1 の位相が $2n\pi \pm \pi/2$ 毎の飛びになるように光路差を変化させても、変化量が波長の数倍異なることに伴う $\Delta\phi_k$ の変化は π 以下にでき、画像取込時の光路差を λ_e と $\Delta\phi_k$ から計算できる。ところで当然ではあるが $\Delta\phi_k$ は ϕ_k^1 や ϕ_k^2 と同じオーダーの測定誤差を含む。 $\Delta\phi_k$ と λ_e を用いる光路差計算の誤差は、 λ_1 と ϕ_k^1 や λ_2 と ϕ_k^2 を用いる誤差に対しほぼ (λ_e / λ_1) 倍となりかなり大きい。故に λ_e と $\Delta\phi_k$ からの光路差評価と、 λ_2 と ϕ_k^2 からの光路差評価を互いに補うように組み合わせて、下記の式で与えられるより正確と考えられる光路差計算を行った。

$$\text{LownoiseOPD} = \text{int}' \left\{ \frac{\lambda_2 \Delta\phi - \lambda_2 \phi_k^2}{2\pi\lambda_2} \right\} \lambda_2 + \lambda_2 \frac{\phi_k^2}{2\pi} \quad (4)$$

ここで int' は四捨五入による整数計算を指す。式(4)の第1項では λ_2 の干渉縞の次数を求めその縞の位相ゼロの点の光路差を計算し、第2項ではその縞の実際の位相から第1項に対する補正分を求めている。

LownoiseOPDは個々の画素に対しその点での光強度変化から画像 k 取込時の光路差を計算するものである。故に画像番号 k と、 k の画像に対する LownoiseOPD を用い、その画素が見ている凹凸表面の高さを次式で計算する。

$$hight = \frac{-1}{2} \left(\frac{\lambda_2 \alpha_2 k}{2\pi} + LownoiseOPD \right) \quad (5)$$

第1項は画像k読み込み時の対物レンズの移動量であり、第2項は画像k読み込み時の光路差である。これらの和に対し符号をマイナスとして、Z軸走査開始点の参照面高さに対する相対高さを計算している。式(5)より、式(2)のコントラストの計算で誤差が入り、kが真値から1もしくは2ずれたとしても、その誤差はLownoiseOPDで補正されることが分かる。

3. 実験

3.1 形状計測装置の光学系

図1の装置を用いて干渉像をコンピュータに取り込むが、CCDカメラが光信号蓄積中にZ軸走査により光路差が大きく変化すると、光強度は激しく変化しカメラは必要な時点の干渉光強度を正しく取り込めない。そこで、光源には発光を短時間にしても光量の稼げる高輝度LEDを使用した。また位相シフト時のZ軸位置の精度向上と安定した干渉画像読み取りを実現するため、ほぼ一定の速度でZ軸走査し振動を発生させないようにして、必要なタイミングで短時間発光させる方法¹²⁾を用いた。高輝度LEDには青緑色とオレンジ色の出力1Wのルクセオン製品を用い、これらの光をダイクロミックミラーを用いて両方共に光軸に沿って進むようにして広帯域2色光源とした。ミラー通過後のスペクトルを分光器で測定した結果を図4に示す。これらの光をハーフミラーで反射させ対物レンズを通して検査面に当てる。対物レンズは内部に干渉用の参照面を持つミラー型であり、検査面と参照面で反射された光がレンズを上方向に再通過して平行光線として進み（無限焦点系）、レンズを通過してCCDカメラ受光面上で結像する。

3.2 LED発光のタイミングとレンズ移動の制御

20倍 (NA=0.4) のミラー対物レンズの光軸方向の走査はストローク 100 μm の高精度PZT位置決め装置 (PI社:P-721.20) を用いた。位置決め分解能はサブnmでストローク全域での繰り返し精度は5nm以下であり、時間応答性は数ms (共振周波数は250Hz強) である。位置指令はコンピュータのPCIバスに接続された16bitのデジタルI/Oリアルタイムインターフェイスボードより行っている。リアルタイムボードは内部にクロックとCPUを持ち、コンピュータ本体の負荷に影響されることなく、決められた時間に決められた信号を発生できる (誤差1 μs) ので、PZTへの制御信号、高輝度LEDのON-OFF制御信号、画像取込指令信号をこのボード1枚から出している。一定の光路差変更毎にLEDの交互点灯を行わせた時のタイミングを図5に示す。PZTへの出力は上方のグラフとなる。

3.3 干渉画像のコンピュータへの取り込み

干渉画像の取込にはデジタルCCDカメラ (浜松ホトニクスC7300-10-12NRP, 1024 \times 1024画素) を用いた。カメラは12bitのA/D分解能でサブアレイ取込も可能であり、撮像のタイミングも外部信号に同期させることができる。この機能を用いて80 \times 1024の画像を約111Hzで取り込んだ。なお、画素サイズは6.2 μm \times 6.2 μm であり、レンズ倍率から測定面でのサイズは0.3 μm \times 0.3 μm となる。

3.4 干渉コントラストからの最大振幅画像の決定

λ_1 の光でほぼ $6\pi + \pi/2$ の位相シフト毎に取り込まれた

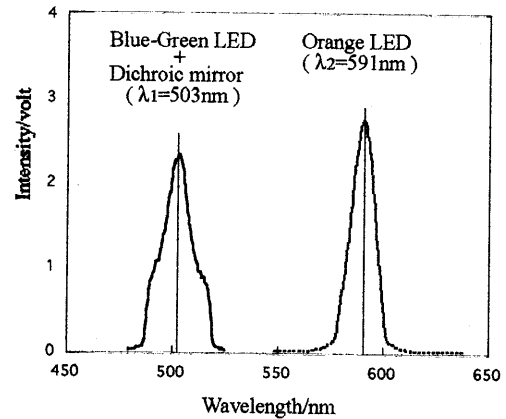


Fig.4 Spectrum of the light beams after passing through the dichroic mirror. Their mean wavelengths are 503nm, 591nm

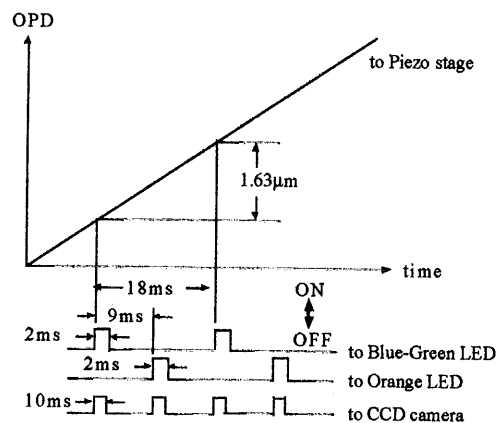


Fig.5 Timing chart of control signals which a real-time I/O digital board in a computer makes and sends

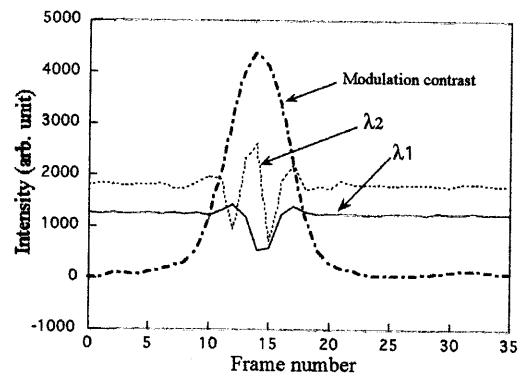


Fig.6 Intensity changes at a certain pixel of interferograms acquired during a vertical scanning. Solid line is of λ_1 . Dotted line is of λ_2 . Dotted and broken line is the additions of squares of $|V_i|$ calculated by Eq.(2) for λ_1 and λ_2

一連の干渉画像、並びに λ_2 の光でほぼ $6\pi - \pi/2$ 毎に取り込まれた一連の干渉画像から、式(2)で与えられるコントラストの変化をある画素に関し抽出した (図6)。図の点線、実線は各波長での光強度変化である。一点鎖線は波長別のコントラストの和の画像番号での変化であり、1波長のコントラストより精度が優れると考えて用いた。光路差ゼロ付近で一つの大きなピークとなっている。この形状からその画素での最大コントラスト画像番号kを計算した。

3.5 形状測定結果

最初に標準段差試料を取り上げて形状を測定した。nm精度での測定では、ちょっとした環境温度変化や振動による構成部

品の変形が1nm以上の量に及ぶため、測定した数値が正しいか否かが良く問題となる。そこで測定器の精度評価のために標準段差試料を用いての検証が広く行われる。公称値 $84.9 \pm 1.1\text{nm}$ の高さの標準段差試料を測定したところ計算値は 82.8nm となった。これは誤差が 2nm と大きく、原因を究明する中でその誤差は対物レンズが持つ光線の集束効果 (Numerical Aperture 効果) から来ていると考えられた¹³⁾。この発生メカニズムから高さを補正する方法を検討した。そして、本装置が高精度なPZT位置決め部を持っていることから、この位置移動量が正しいことを前提とした補正法を独自に開発し組み込んだ¹⁴⁾。組み込んだ補正法は形状測定のために取り込んだ画像をそのまま利用でき、抽出位相と移動量から高さ計算に当たっての波長の実効値を計算する。計算した結果、 λ_1 に対しては波長を 503nm から 513nm に、 λ_2 に対しては 591nm から 601nm に変更すべきことが分かった。補正後の波長を用いた再計算結果を図7に示す。計算値は検定されている段差保証内に収まっており、本方法が 1nm 以下の誤差で段差を測定できたことを示す。次にステンレスボール (直径 12mm) を測定した。結果を図8に示す。測定面での画素サイズ ($0.3\mu\text{m}$) と対物レンズの解像度 ($0.6 \times \lambda / \text{NA} = 0.9\mu\text{m}$) を考慮し、横方向に 3×3 のメデアンフィルターを掛けている。球面上の細かな傷まで測定できており、本方法の有用性を示す。形状計算中途の式(4)の第1項での四捨五入による縞次数 (整数値) 抜き出しの様子を図9のヒストグラムに示す。第1項の括弧内の $(\lambda_2 \Delta\phi - \lambda_2 \phi^2) / 2\pi\lambda_2$ の端数の測定領域における分布は0近傍にあり縞次数が正しく抽出できている。縞次数に誤差が入り込まないので図8は1波長と位相シフト量 $\pi/2$ を用いる形状測定と同じ精度と考えられる。

4. 結果の検討と装置に関する考察

ここでの形状測定では画像取込毎のZ軸移動量は $0.407\mu\text{m}$ ($=1.63\mu\text{m}/4$) であり、画像は 111 枚/秒の取込速度であるため、ステージの走査速度は $45.2\mu\text{m}/\text{sec}$ となった。画像取込毎の移動量は $(1/4) \{ \lambda_1 \times (2n\pi + \pi/2) \} / 2\pi$ で与えられるため、 n を3でなく4や5にして走査速度をさらに高速にすることは可能である。しかし n を大きくすると位相計算に用いる画像に強いピントぼけが入ってくる。ピントぼけはレンズの焦点深度と関係する。我々が用いた20倍のミロー対物の焦点深度は $1.71\mu\text{m}$ であり、 $1.71\mu\text{m}$ 中に7画像以上取り込めることが理想的である。上記の測定では1波長での移動距離は $0.81\mu\text{m}$ であり、7枚では $5.6\mu\text{m}$ となる。この場合でも図8に示す細かい形状が測定できたことは注目できる。5画面位相シフト法を用いるとこの条件は緩和されるが位相計算式の信号雑音比¹⁰⁾の低下からステンレスボールの測定で雑音の増加が見られた。標準段差試料やMEMSデバイス等の横方向に滑らかな表面の測定では、焦点ぼけの影響はエッジ部分を除き殆どないと思われる。

次に、本方法で使用している2波長について考察する。測定精度に強く影響するのは位相抽出精度である。組み上げた装置では不用意な振動を避け高速化を実現するために等速度でZ軸走査しながら等光路間隔で波長別の画像を交互に取り込んでいる。位相抽出精度を上げるために等間隔移動に伴う位相シフト量を共に $n\pi \pm \pi/2$ に近づけると言う視点から最適波長を探った (なぜなら $n\pi \pm \pi/2$ に近いほどサン

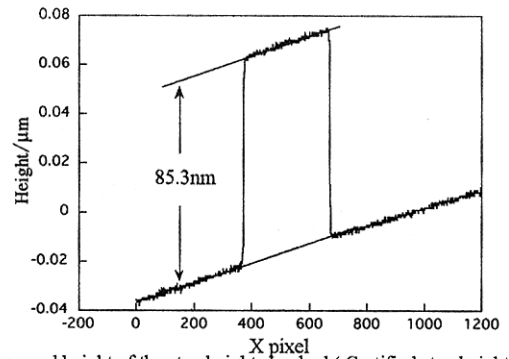


Fig.7 Measured height of the step height standard (Certified step height is $84.9 \pm 1.1\text{nm}$). The effect of NA has been corrected

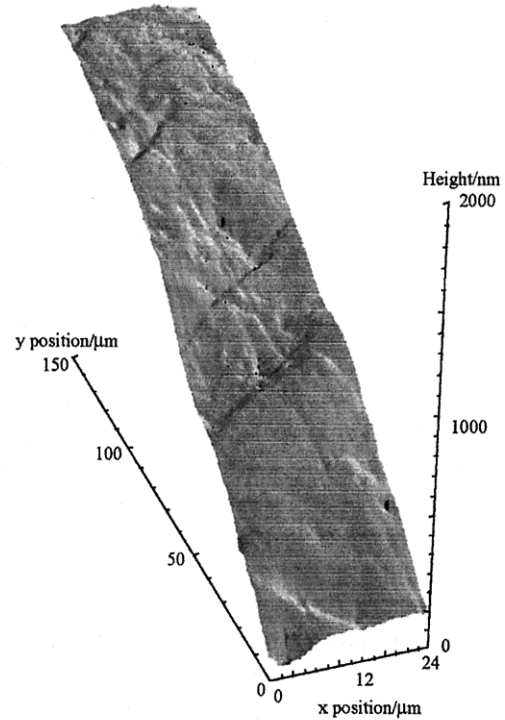


Fig.8 Measured 3-D surface of a stainless ball having 12-mm diameter

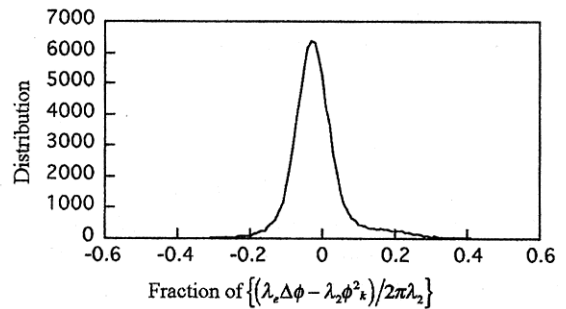


Fig.9 Distribution of fractions for the argument in int function of Eq(4)

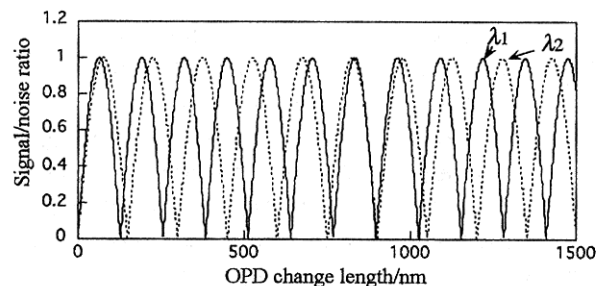


Fig.10 Signal to noise ratio of the phase calculated by Eq(3). The ratios are roughly estimated as $|\sin(2\pi/l\lambda_1)|$ and $|\sin(2\pi/l\lambda_2)|$, where l means OPD change length / interferogram

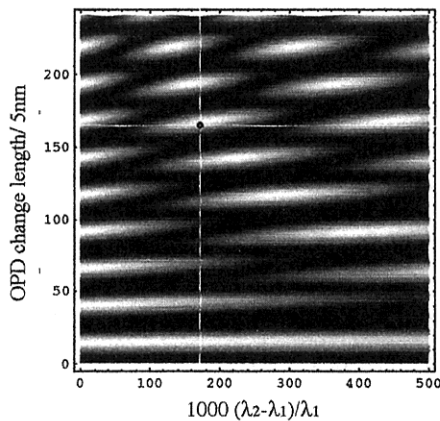


Fig.11 $|\sin(2\pi l/\lambda_1)\sin(2\pi l/\lambda_2)|$ dependences on OPD change length l and λ_2 and λ_1 . Brightness in Figure means good signal to noise ratio of the extracted phase used to 3-D shape measurement

リング光強度の強弱幅を大きくでき抽出位相のS/Nが良いから). 光路差変更量 l を変える時の波長別の $|\sin \alpha|$ を数値計算した結果を図10に示す. 両曲線共に数値が高いほどS/Nが良いので両者の積を考え, 積が光路差変更量 l や λ_2/λ_1 に対してどんな値を取るかを再度数値計算した. 積の分布を図11に示す. 輝度が明るい程, 高精度が期待できる. 我々が使用した条件は白十字の点である.

精度を考える上で, 波長差が影響する項目がもう一点ある. 対物レンズの色収差(ピントの合う位置が波長によって異なってくる問題)である. 顕微鏡メーカーは特定の三色で同じピント位置となる(アポクロマートと呼ばれる)ようレンズ設計している. しかし, 我々が使用した波長では色収差が観測された. これを補正するために図12に示すレンズセットを図1のハーフミラーの上に挿入し, 両波長共にほぼ同じ位置でピントが合うようにした.

最後に測定精度を既存製品と比較したい. 既存商品のカタログでは垂直方向分解能としてZygo社では0.1nm, 他社では0.01nmを示す商品もあるが, それらは位相抽出精度からの高さ分解能である. 垂直走査型干渉計の形状測定精度はZ軸走査部の位置決め精度で上限が決まると考えられる. 本方法ではZygo社の商品と同じくPI社のPZT装置を用いた. PI社のPZT駆動装置では100 μ mの走査範囲での繰り返し精度は5nm以内で直進性も高い. 走査範囲が短いとそれに応じて精度は良くなる. 図8で取り上げた形状の凹凸差は2 μ mぐらいだが, 凹凸差が十数 μ mの時その位置精度はnm前後と思われる.

走査速度に関しては各メーカーのカタログでは速い数値も多く見受けられる. しかしその速度は高精度計測を行った場合ではなく, nm精度での速度表示はZygo社のものだけのようなのである. Zygo社の場合, 本研究と同じ速度のカメラを用いた場合の走査速度は14.5 μ m/sである. 本測定方法では14.5 μ m/sの約4倍弱の45 μ m/sで図7や8の結果が得られている.

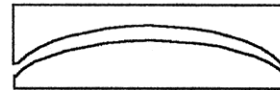
5. 結 論

本論文で提案した方法は以下のようにまとめられる.

- (1)近年高輝度化が著しい高輝度LEDを用い, 熱エネルギーを殆ど出さず高速点灯特性を利用して, 干渉を利用した高精度形状測定が行い得た.
- (2)二波長を用いることで, 位相シフト量を $6\pi \pm \pi/2$ と大幅

Plano-concave silica lens

$f = -149.7/514.5\text{nm}$
 $f = -150.0/546.1\text{nm}$
 $f = -151.0/632.8\text{nm}$



Plano-convex BK7 lens

$f = 149.7/514.5\text{nm}$
 $f = 150.0/546.1\text{nm}$
 $f = 151.2/632.8\text{nm}$

Fig.12 A lens set inserted just above the big half mirror in the microscope of Fig.1 to obtain the same focus shifts with light of 503nm and 591nm

に増やしても光干渉応用形状測定が可能になった. その結果取込速度111frame/sのカメラを用い45 μ m/sのZ軸走査速度で画像を取り込んで形状測定できた.

- (3)高倍率の干渉対物レンズを用いた形状計測では, レンズのNA効果で形状計算に使う波長が実際の波長と異なる. 測定時に取り込んだ画像を用いてこの補正を行い, 標準段差を誤差1nm以内で形状測定し得ることを確認した.

本研究は, 科学研究費補助金「基盤研究(B)(2), 課題番号14350129」の交付を受けたこと, また, 研究の実施に当たっては, 産業総合研究所の高辻研究員と立山マシン(株)の五十島様他のご協力を頂きました. ここに感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) Zygo New View 5000, キヤノン販売(株). 25Hzの画像取込では2.4 μ m/s, 高速カメラオプションでは14.5 μ m/s.
- 2) Wyko NT3300 Optical Profiler, 榊日本ビーコ. 垂直スキャン速度7.2 μ m/s, オプション付きでは14.4 μ m/s.
- 3) Micromap550N, (株)菱化システム販売.
- 4) Kjell J.Gasvik: "Optical Metrology", 267 (phase unwrapping), John Wiley & Sons. Ltd. 1995.
- 5) Kieran G.Larkin: Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry", J.Opt.Soc.Am. A, **13**, 4 (1996) 832.
- 6) L. Deck and P.d.Groot: High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry, Appl. Opt., **33**, 31(1994) 7334.
- 7) 石原満宏, 佐々木博美: 非走査マルチビーム共焦点撮像系による高速三次元計測, 精密工学会誌, 64, 7 (1998) 1022. 高岳製作所(株)から汎用共焦点計測器FVI-2000として販売.
- 8) 東レエンジニアリング "表面形状測定装置 SP-500".
- 9) P. Hariharan, B.F. Oreb, and T. Eiju: Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm, Appl. Opt., **26**, 13 (1987) 2504.
- 10) P. d. Groot: Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window, Appl. Opt., **34**, 22 (1995) 4723.
- 11) A.Harasaki, J.Schmit, and J.C.Wyant: Improved vertical-scanning interferometry, Appl.Opt., **39**, 13 (2000) 2107.
- 12) 上田覚司, 安達正明, 稲部勝幸, 五十島一興: 2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2003) 496.
- 13) K. Creath: Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives", Appl. Opt., **28**, 15 (1989) 3333.
- 14) 安達正明, 上田覚司: 2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004) N62.