ヘテロダイン干渉法による動的変位計測のデジタル化*

高橋 康英** 中村 岳司*** 趙 大筠†

Digitalization of Dynamic Measurement of Nanometer-order Displacement
Using Heterodyne Laser Interferometry

Yasuhide TAKAHASHI, Takeshi NAKAMURA and Da Jun ZIAO

The dynamic measurement of nanometer-order displacements was realized by using our heterodyne laser interferometry method. The measuring system of the existing method contains two analog devices, namely, a frequency divider and a phase meter, and various electrical and electronic noises are apt to be picked up by them. In addition the frequency divider has a minimum limit of 1/32 and troublesome manual operation is needed in the range exchange. To avoid the above inconveniences, we replaced the analog devices with a digital method using a special software package. The improvement was successful and the measurable frequency range was expanded to 300 Hz and above.

Key words: heterodyne Laser interferometry, dynamic measurement, nanometer measurement, digitalization of analog devices, digital data processing

1. ま え が き

ナノメータの寸法領域は徐々にではあるが、身近なものとなりつつある¹⁾。しかし、ナノメータ級の対象を計測することは容易ではない。特に、これを動的に計測するとなると更に難しくなってくる。我々は、レーザヘテロダイン干渉法²⁾において、ウォラストンプリズムを背面对称に配置し、p波とs波の2平行ビームを得、一方を基準光、他方を測定光とすることにより、計測可能なダイナミックレンジを大幅に拡大した^{3)~7)}。また、アナログ計測系に周波数低減器を挿入し、信号の周波数を低減することによって、動的計測における周波数レンジを100Hzまで、拡大させることができたが、使用している周波数低減器と位相検出器は自製のアナログ計測器であり、

① 筐体が大きく、配線は長いため、ノイズを拾う可能性大
② レンジの切換えは手動で不便などの欠点を有している。
その他、これらに損傷を受けた場合、代替するものが無く、修復は難しいとの懸念も有った。そこで、データ処理系にすでに使用中の、汎用プログラムLabVIEWを用いて、周波数低減および位相検出の両アナログ処理系をデジタル系に置き換えることを試みた^{11), 12)}。デジタルデータ処理は一般に多様な処理ができ、精度は高く他のシステムとの結合自由と考えられる。今回、デジタル処理系を導入した結果、周波数レンジも300Hz以上に拡大でき、先記の種々の不都合や懸念も解消されることになった。以下、その方法と各種の検証実験、および、得られた結果について報告する。

2. 計 測 の 原 理

計測原理の詳細は前論文に譲るが¹⁰⁾、アナログ処理系の全体系における役割りを明確に示す意味で、若干の説明を行う。本研究では光源として、He-Ne レーザ（ゼーマン型、波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$ ）を使用し、図1(a)に示す光路構成による計測を行っている。今回は図中のAnalog partをLabVIEWのブロックダイアグラム法を用いてデジタル処理することを試みた。供試部の詳細を図1(b)に示す。光源から発射されたレーザ光は、ガラス基板により透過光と反射光に分けられる。後者は光電検出器(A)により基準ビート信号を形成する。一方、透過光は背面对称に設置された2枚のウォラストンプリズムを通過する。鏡筒内の第1プリズムでp波とs波に分かれ、第2のプリズムで再度屈折し平行光となる。p波は測定対象の可動部に取り付けた反射鏡に当たり、s波は基準面に取り付けた反射鏡に当たる。この2光波が元の経路を戻り、再度1光波となりミラーで直角に反射され、光電検出器(B)により測定ビート信号を形成する。測定対象の可動部を変位させることによってp波とs波に位相差が生じ、基準ビート信号、測定ビート信号の間にも位相差が生じる。これを従来はアナログ形の位相検出器(図1の phase meter)により得ていたが、今回は、光電検出器からの出力をデータ集録ボードによりパーソナルコンピュータ(P/C)に取り込み、LabVIEWを用いて演算を行い、位相差を計測して必要な情報を得る。

数式で表現すれば、位相差 $\Delta\phi$ は下式で表される。

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = 2\pi f(\Delta t_1 - \Delta t_2) \quad (1)$$

ただし、

$$E_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \quad (2)$$

$$E_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \quad (3)$$

* 原稿受付 平成14年5月10日

** 正会員 広島工業大学工学部 (広島市佐伯区三宅2-1-1)

*** 学生会員 広島工業大学大学院

† 広島工業大学大学院

Fig.1 Schematic diagram of the apparatus

ここに,

- $E_1(t)$: 基準ビート信号で周波数 f_1 の光波
 $E_2(t)$: 測定ビート信号で周波数 f_2 の光波
 A_1, A_2 : 振幅 ϕ_1, ϕ_2 : 位相
 f : ビート周波数 $\Delta t_1, \Delta t_2$: 時間遅れ

である.

また, 周波数範囲を拡大させるため, 周波数低減回路 (図 1 の frequency divider) を用いていたが, この処理も今回, LabVIEW によるデジタル処理に置き換え, レンジの拡大を試みた.

3. 汎用プログラムによるデジタル処理

前章で述べた計測に伴う LabVIEW によるデジタル処理を, 具体的ブロックの構成と入出力例を示して説明する. 周波数低減の信号処理を数式で表現すると以下のように示される.

$$E_{N1}(t) = A_1 \cos \{(2\pi f_1 t + \phi_1)/N\} \quad (4)$$

$$E_{N2}(t) = A_2 \cos \{(2\pi f_2 t + \phi_2)/N\} \quad (5)$$

ここに,

$E_{N1}(t), E_{N2}(t)$: $1/N$ に低減後の基準信号および測定ビート信号

N は正の整数で $1/N$ が低減率に相当する. 従って, 2 つの信号の位相差は

$$\Delta\phi' = (\phi_1 - \phi_2)/N \quad (6)$$

となり, $1/N$ に低減されることになる.

図 2 において左側の波形または位相の区切りを示す縦線は, 中間部ブロックを経由すると右側の波形, あるいは縦線となる. ①はビート信号の原波形を示している. このビート信号は図 2 の(a)に示すブロックを通して移動平均をとることによって, スムージングされ, (b)に示すブロックを通してエッジを検出し易くしている. $N=2$ の場合, 図 2 の(c)のブロックを通すことによって④は⑤に変換される. これは, ④の信号の周波数を $1/2$ に低減すると, 位相の縦線は⑤に示すような間隔となることを表している. 実際には縦線を 1 本飛びに間引いて行く. また, ④と⑤は周波数低減後の位相情報についても示しており, 低減前に 2 信号間にあった 90° の位相差が低減後には 45° に減少することを意味している. 以上のような処理により基準ビート信号及び測定ビート信号の周波数は, それぞれ $1/2^n$ ($n=1,2,3, \dots$) に低減され, 基準波の後に現れる測定波のエッジを抽出し, 位相を分割する.

また, 大変位の動的測定において, 位相は $-\pi \sim \pi$ までの主値しか取ることができない. その為, 図 3 の(a)に示すような振幅の小さな場合では問題無いが, (b)に示すように振幅の大きな場合には, π ごとに位相飛びが発生し, 不連続な位相分布となる. これは, 大変位干渉法を行う上で不都合となるので, 位相飛びを生じた点で π , または, $-\pi$ を加えて補正する (アンラップ処理) を行う必要がある^{8), 9)}. アンラップ処理後の波形は, 図 3 (b)の下に示す通りである. この原理に関しては, 前論文を参照されたい¹⁰⁾.

図 4 は, 上記の処理を行うための LabVIEW を用いた全体の

Fig.2 Principle of frequency divider

Fig.3 Phase unwrapping

図中の①～⑩の役割りを以下に示す。

① 基準ビート信号の取り込み部	⑥ 基準ビート信号の後で現れる測定ビート信号のエッジを抽出
② 測定ビート信号の取り込み部	⑦ 各エッジを分割
③ スムージング (Fig.2(a)に対応)	⑧ 位相差検出部
④ エッジ検出 (Fig.2(b)に対応)	⑨ アンラップ処理部
⑤ 低減率のコントロール部	⑩ 低減によるエッジの間引き (Fig.2(b)に対応)

Fig.4 Block diagram of LabVIEW

Table.1 Mean value and standard deviation

	0°	30°	88°
$\bar{x}$ nm	284.94	284.19	284.74
σ nm	2.07	2.39	5.01

ブロックダイアグラムである。①～⑩に示す主要部の役割は、各番号に対応して下側に補足説明を加えている。今回、重点的に作成したブロックは、周波数低減部、および位相差検出部の役割を果たしている。

表1は、スムージング後の正弦波形について、エッジを検出する際に設定するしきい値を0°、30°、88°の3種の角度で設定し、夫々の角度での検出にどれだけのバラツキがあるかを調べるため、両振幅285.0nm、周波数100Hzの変位量を与えて、各10回測定した結果である。これより、0°、30°の場合、設定変位に対し平均値の差は0.8nm程度、標準偏差も2.39nmと、小さな値であることが解った。しかし、88°の点では、平均値の差は0.3nm程度であるのに対し、バラツキが大きくなる傾向を示した。したがって、LabVIEWを用いて、正弦波のエッジを検出するには、頂点に近い90°近傍は避けて設定して行う方がよい。

4. 計測結果

実測例として、光ディスク装置の光ヘッドの送り機構部を用いた。送り機構部は電圧を与えると前後にシークする。周波数

Fig.5 Frequency vs. actuator stroke
(Optical disc pickup driver)

を10～300Hzで、低減率を1/2～1/256に変化させた場合の振動計測を行った。計測結果のグラフを図5に示す。

従来、低減率1/32までの設定が限界で、周波数レンジも100Hzが限界であったが、1/256までの設定が可能となり、測定レンジも低減率1/32の時、約85μmまでであったが、1/128では、約200μmまでが測定可能な範囲となった。低減率を1/2～1/256まで変化させると、周波数に対する測定可能な変位の範囲は拡大したが、1/256では高周波領域におけるバラツキが大きくなり、安定的に測定できなくなった。

5. む す び

レーザヘテロダイン干渉法による動的変位量計測について、計測可能なダイナミックレンジの拡大、また、システム上の欠点の改善の目的で、LabVIEWを用いて、周波数低減および位相検出のアナログ処理系をデジタル処理系に置換え、更に、波数の読み取り誤差の要因となる高周波成分を除去するなどの改良を行った。

その結果、

- (1) 計測可能な周波数範囲が 300Hz まで拡大された。
- (2) 計測可能な変位は約 200 μm まで拡大された。
- (3) 低減率 1/256 以下ではバラツキが大きくなる。

などが明らかになった。また、先記のノイズを拾う可能性があるなどの不都合や懸念も解消された。

今後、応用分野の拡大を目指し、更なる性能向上を図りたい。
応用分野の具体的例としては、

- (a) 複数波を用いた合致法ではなく、単一波長、単一ビームを用いた 1 ステップでの大段差 (ex. エタロンスペーサの高さ) 計測
- (b) マイクロアクチュエータ用材料、あるいは、それらをもって構成されるマイクロ機構部の動的応答計測
- (c) 機械、構築物、各種材料等の極微小な動的変位計測による、それらの故障、あるいは、異常の検知と予知

などが考えられる。また、実用性を高めるためには、計測系そのものの小形化が必要である。

参 考 文 献

- (1) 中山 真, 津田展宏, 田中 充: ナノメータオーダの計測技術の現状と将来, 精密工学会誌, 56, 3(1990)438.

- (2) H.Takasaki, N.Umeda and M.Tsukiji: Stabilized trasverse Zeeman Laser as a New Light Source for Optical Measurement Appl. Opt., 19, 3, (1980) 435.
- (3) 高橋康英, 木曾又一郎, 寺本仁志, 岩田耕一: 光干渉法による大段差のナノメートル計測, 精密工学会誌, 59, 5 (1993) 755.
- (4) 高橋康英, 木曾又一郎, 服部賢治, 岩田耕一: レーザヘテロダイン干渉法による微小角の動的測定, 精密工学会誌, 60, 9 (1994) 1345.
- (5) Y.Takahashi, M.Kiso, T.Ishii H.Teramoto and K.Iwata: Optical Interferometry for Nanometer Measurement of a Large Step, Jpn Soc. Prec. Eng., 28, 1, (1994) 64.
- (6) 高橋康英, 秋月啓作, 木曾又一郎, 長谷川直樹, 村瀬成一: レーザヘテロダイン干渉法による動的変位量の測定, 1997 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1997) 807.
- (7) レーザ計測ハンドブック編集委員会: レーザ計測ハンドブック, 丸善, (1993) 83.
- (8) M.Takeda, H.Ina and S.Kobayashi: Fourier-transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computerbased Topography and Interferometry, J. Opt. Soc. Am., 72, 1 (1982) 156.
- (9) T.Kreis: Digital Holographic Interference-phase Measuremnt Using the Fourier-transform Method J. Opt. Soc. Am. A, 3, 6, (1986) 847.
- (10) 高橋康英, 秋月啓作, 木曾又一郎, 村瀬成一, 長谷川直樹: レーザ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 (1998).
- (11) 高橋康英, 中村岳司, 趙大筠: ヘテロダイン干渉法による動的 nm 計測のデジタル化(位相分割・検出のデジタル化), 精密工学会秋季大会学術講演会論文集(2001) N05.
- (12) 高橋康英, 中村岳司, 趙大筠: ヘテロダイン干渉法による動的 nm 計測のデジタル化(その 2), 精密工学会春季大会学術講演会論文集 (2002) P66.