

波長可変レーザーを用いた干渉計における段差測定の高感度化

植木 伸明^{*,***}・山口 一郎^{**,***}

*富士写真光機(株)光学機器部 〒330-8624 さいたま市植竹町 1-324

**理化学研究所光工学研究室 〒351-0198 和光市広沢 2-1

***埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 さいたま市下大久保 225

High Resolution Measurement of Steps Using a Wavelength Scanning Interferometer

Nobuaki UEKI^{*,***} and Ichirou YAMAGUCHI^{**,***}

*Fuji Photo Optical Co., Ltd., 1-324 Uetake, Saitama 330-8624

**Optical Engineering Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
2-1 Hirosawa, Wako, 351-0198

***Department of Environmental Science & Human Engineering, Graduate School of Science and
Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Saitama 338-8570

The wavelength scanning Fizeau interferometer enables the measurement of steps that are higher than $1/2$ wave. For the calculation of the interference signals, FFT method is generally used. However, its measurement resolution is lower than the single wavelength Fizeau interferometer using fringe scanning method with a PZT transducer which translates the reference surface. Therefore, in order to improve the measurement resolution, we have tried to combine phase data and frequency data calculated from only the interference signals with wavelength scanning. The advantage of this interferometer is no use of mechanical movement in the interferometer. From a 1 mm step, we got satisfactory result because we used phase data. The repeatability of 0.3% was observed from 3 repeated measurements.

Key words: wavelength scanning, interferometer, FFT, step, Fizeau

1. はじめに

形状の高精度測定法として、レーザー干渉計が使われている。近年は、参照鏡を圧電素子 (PZT) により駆動させる位相シフト法¹⁾が定量的な自動測定に一般的である。

単色光を用いた干渉計においては、位相解析より求めた位相が、 2π 以下に折り畳まれてしまうため、位相接続法²⁾が用いられる。しかし、波長の $1/2$ 以上の段差をもつサンプルに関しては、形状を決定することができない。これに対し、2波長位相シフト法³⁾が報告されているが、この場合も等価波長の $1/2$ を超えるような段差測定は困難である。

これらの問題を解決するために、多波長を用いた方法が報告されており、これらは大きく2つに分けられる。

1つは、波長幅の広い光源を使う低コヒーレンス干渉計である。これは参照面かサンプル面を光軸方向に動かし、干渉縞のコントラストが最大になるゼロ光路差位置を検出

して段差形状を求める⁴⁾。しかし、この方法は、機械的な可動部が必要となる。

もう1つは、複数の波長を走査する波長走査干渉計である。波長を走査した際の干渉強度変化の周波数を求めるため⁵⁾、干渉計の機械的可動部が不要という利点がある。しかし、周波数解析を用いた場合、分解能が最大波長変化量により決定されるため、位相シフト法ほどの高感度な測定はできない。

高感度化を目的として、波長走査と位相シフトを組み合わせる手法⁶⁾が報告されているが、この方法では参照面の機械的駆動を必要とする。

PZTを用いた位相シフトに対し、半導体レーザーの注入電流の変化による波長走査を用いた位相シフト法を行っている報告がある⁷⁾。これは、干渉計にあらかじめ大きな光路長差を与え、また、高精度な平面測定に用いるため、全面がほぼ一定光路長差であるとして位相を求めている。

E-mail: ueki@msv.fujinon.co.jp

しかし、段差が波長の1/2を大きく超えるサンプルの場合、光路長差が一定とみなせないため、波長走査で位相シフトさせる場合、段差の両側でシフト量が異なり、上記の方法は適用できなくなる。

今回、筆者らは、波長走査レーザーを用いた干渉計において機械的駆動部を用いず、周波数解析と波長走査を用いた位相シフト法を組み合わせ、高感度な段差測定を行う方法を提案する。

2. 測定原理

実験で使用した波長可変レーザーの特性により、波長走査干渉計の原理から要請される等波数間隔ではなく、等波長間隔で波長走査を行い、多数の干渉縞画像を得る。この画像を並べ直して得られる各画素での干渉信号に対し、フーリエスペクトルを求め、そのピーク位置より周波数を決定する。ここで、等波長間隔測定によるピーク決定誤差とフーリエ変換で得られたフーリエスペクトルのピークを2次関数でフィッティングするとき生じる内挿誤差を取り除く方法を提案する。また、周波数解析に用いた干渉縞画像と周波数解析から得られた参照面とサンプル面の光路長差(OPD)より、波長走査測定開始時と終了時の位相を波長走査による位相シフト法より求めた。こうして得られた位相を光路長差に貼り付けることで、測定感度を向上させた。

解析は、以下に示すように①～⑤の5段階で行う。

① 周波数解析によるOPDの決定

波長を $\lambda_0 \sim \lambda_M$ まで走査し、一定の波長間隔 $\delta\lambda = (\lambda_M - \lambda_0)/M$ で、 $M+1$ 枚の干渉縞画像を取得する場合、 m 番目の波長 λ_m での干渉縞強度 $I_m(x, y, \lambda_m)$ は、

$$I_m(x, y, \lambda_m) = I_0(x, y) \{1 + \gamma \cos[2\pi D(x, y)/\lambda_m]\} \quad (1)$$

$$\lambda_m = \lambda_0 + m\delta\lambda \quad (m=0, 1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

ここで、 $D(x, y)$ はOPD、 $I_0(x, y)$ は平均強度分布、 γ は干渉縞のコントラストをそれぞれ示す。

式(1)に対し、波数が k_0 から k_M に走査され、一定の波数間隔 $\delta k = (k_M - k_0)/M$ で干渉縞画像を取得する場合、

$$I'_m(x, y, \lambda_m) = I_0(x, y) \{1 + \gamma \cos[k_m D(x, y)]\} \quad (3)$$

$$k_m = k_0 + m\delta k \quad (4)$$

となり、通常これに対し、高速フーリエ変換(FFT)を行い、周波数を決定する。

これに対して、 $\lambda_m \gg \delta\lambda$ とすると、

$$k_m = 2\pi/(\lambda_0 + m\delta\lambda) = 2\pi/\lambda_0 - 2\pi m\delta\lambda/\lambda_0^2 \quad (5)$$

となり、波長に対して等間隔となる。そこで、式(1)の

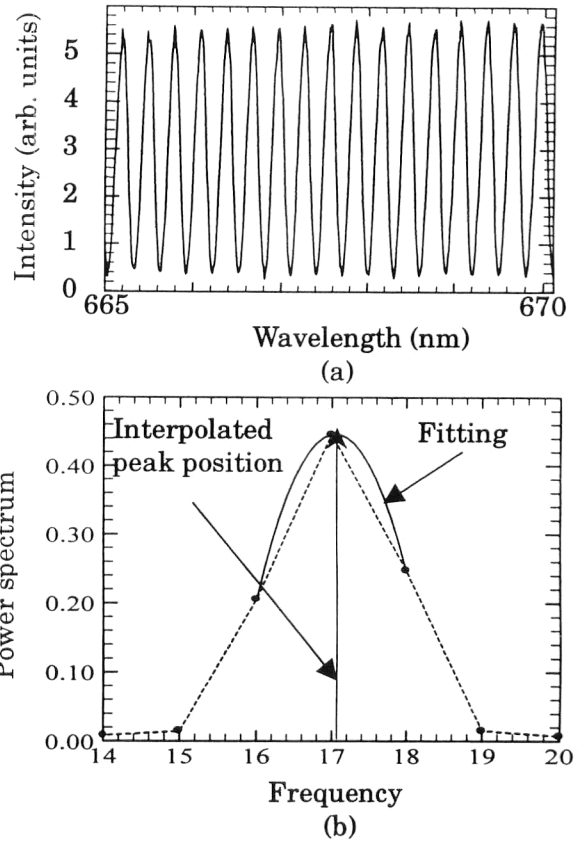


Fig. 1 Interferogram during wavelength scanning (a), and its Fourier transform whose peak position is interpolated using 3 points around the peak (b).

干渉信号 (Fig. 1(a)) に対し FFT を行い、フーリエスペクトラムを求めた。このフーリエスペクトラムのピークとその前後の合計3点に2次関数をフィッティングして、周波数 $N(x, y)$ を決定する (Fig. 1(b))。これよりOPDは、

$$D(x, y) = \lambda_0 \lambda_M N(x, y) / (\lambda_M - \lambda_0) \quad (6)$$

と表せる。

② 周波数解析における誤差の補正

①において、フーリエスペクトルのピークを2次関数のフィッティングにより求めているため、干渉信号の周波数に依存する周期的な誤差が生じる。また、今回使用したレーザーは、等波長間隔の走査を行うため、式(1)の位相変化は、 m に対して線形ではなくなり、周波数が大きくなるにつれ誤差も増加する。この2つの誤差を以下の方法で補正する。

誤差補正に必要な解析誤差補正関数を簡単なシミュレーションより求める。まず、①によって求めた周波数の最大、最小値に対応する光路長差の範囲を考え、それを512に分割した光路長差を作成する (Fig. 2(a))。この光路長差に測定開始波長と終了波長を用いて等波長間隔での縞強度変調を式(1)より作り①と同様の方法で解析す

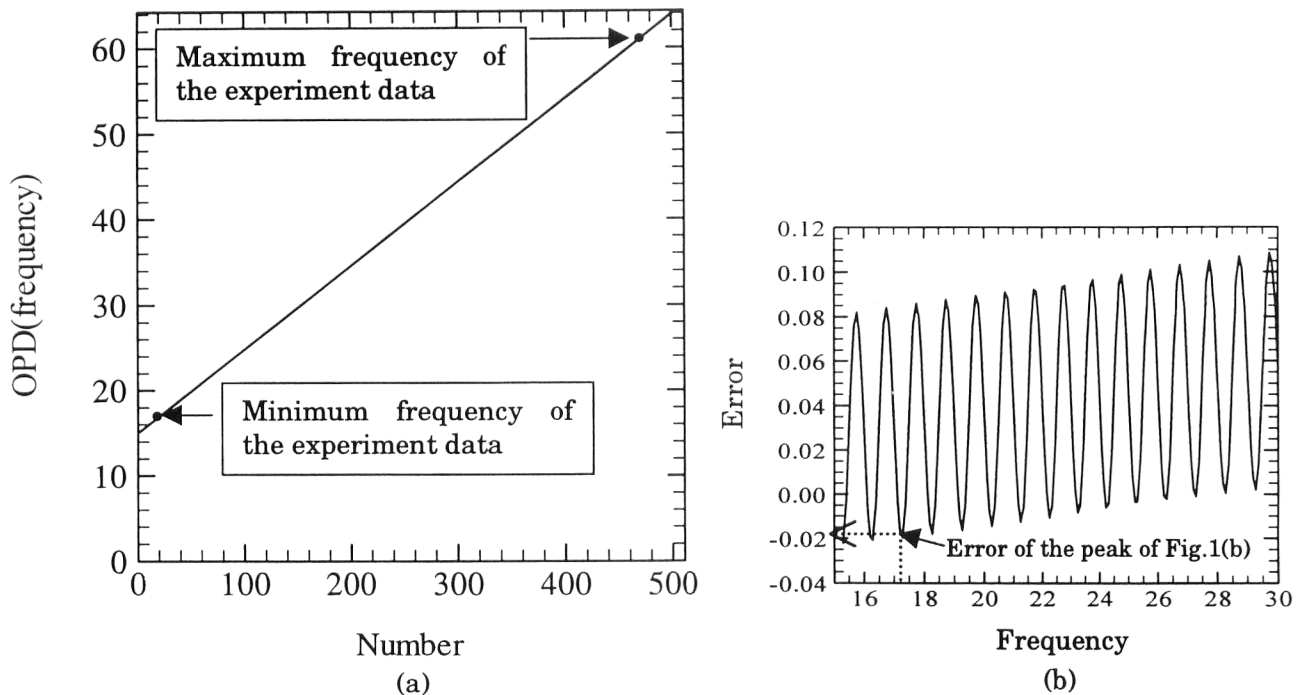


Fig. 2 OPD map to make the varying interferogram from 665 nm to 675 nm for the simulation (a), interpolation error as a function of peak frequency and the error caused by constant wavelength scanning (b).

る。ただし、ここで、 I_0 と γ は 1 とする。この解析により得られた誤差を含む周波数と、もとの誤差を含まないデータを比較することで、①の周波数解析による誤差の関数が求まる (Fig. 2(b))。

①で求めた周波数 $N(x, y)$ から、一例として Fig. 2 (b) の矢印により示しているように、誤差を決定する。この周波数 $N(x, y)$ に依存する補正関数を、 $Er[N(x, y)]$ とし、これによって補正した周波数を $N'(x, y)$ とすると、

$$N'(x, y) = N(x, y) - Er[N(x, y)] \quad (7)$$

となる。

周波数 $N'(x, y)$ から求められる OPD を $D'(x, y)$ とすると、

$$D'(x, y) = \lambda_0 \lambda_M N'(x, y) / (\lambda_M - \lambda_0) \quad (8)$$

となる。

③ 波長走査開始時と終了時の位相の算出

参照面を PZT で移動させ位相シフトを行うことと同様の方法で、波長走査干渉計で得られた干渉信号の位相を求めようとする、各点は、OPD に依存するため、位相シフト量が異なってしまう。また、今回使用したような等波長間隔で走査する場合、それによる誤差も考慮しなければならない。

式 (3) のように等波数間隔で波長走査を行い、干渉縞信号が T 周期変化し、 $M+1$ 枚の干渉縞画像 $I'_m(x, y)$

($m=0, 1, 2 \dots, M$) を取得した場合、離散的フーリエ変換を用いた位相 $\phi(x, y) = 2\pi D(x, y) / \lambda_0$ を求める式は、

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{m=0}^M I'_m \sin \frac{2\pi m T}{M}}{\sum_{m=0}^M I'_m \cos \frac{2\pi m T}{M}} \quad (9)$$

となる¹⁾。しかし、今回用いた走査は等波長間隔であるため、式 (9) の \sin, \cos 内の $2\pi m T / M$ を変える必要がある。

ここで、 \sin, \cos 内の変化を $2\pi\psi(m)$ とすると、 $2\pi m T / M$ を

$$2\pi\psi(m) = D' m \delta\lambda / \{\lambda_0 (\lambda_0 + m \delta\lambda)\} \quad (10)$$

で置き換えればよい。ただし、 $\psi(m)$ は、

$$2\pi D' / \lambda_0 - 2\pi\psi(m) = 2\pi D' / (\lambda_0 + m \delta\lambda) \quad (11)$$

より求まる。これより、開始波長 λ_0 における干渉縞の位相は、式 (1) の I_m を用いて、

$$\phi(x, y, \lambda_0) = \arctan \frac{\sum_{m=0}^M I_m \sin \frac{D' m \delta\lambda_0}{\lambda_0 (\lambda_0 + m \delta\lambda)}}{\sum_{m=0}^M I_m \cos \frac{D' m \delta\lambda_0}{\lambda_0 (\lambda_0 + m \delta\lambda)}} \quad (12)$$

となる。また、同様にして終了時の位相 $\phi(x, y, \lambda_M)$ (波長 λ_M の場合の位相) も決定する。

④ 2 波長の等価波長に対する位相の算出

③によって求めた 2 つの異なる波長 λ_0, λ_M における位相 $\phi(x, y, \lambda_0)$ と $\phi(x, y, \lambda_M)$ の差は、

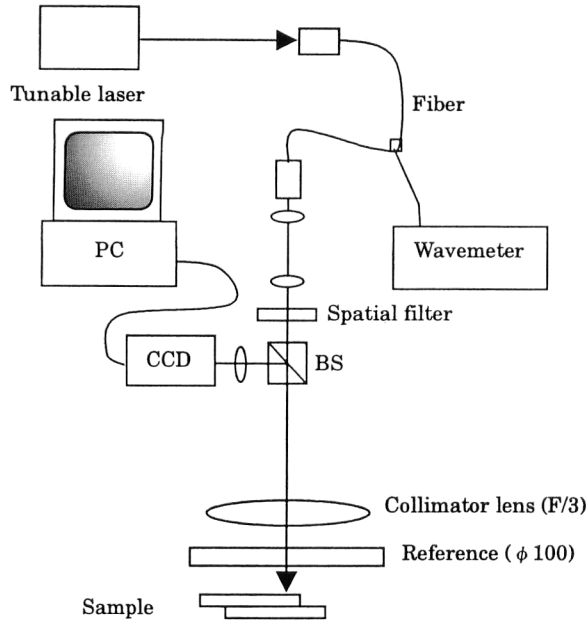


Fig. 3 The wavelength scanning Fizeau interferometer.

$$\begin{aligned}\phi_{\text{eq}}(x, y) &= \phi(x, y, \lambda_M) - \phi(x, y, \lambda_0) \\ &= 2\pi D'(x, y) (1/\lambda_M - 1/\lambda_0) \\ &= 2\pi D'(x, y) / \lambda_{\text{eq}}\end{aligned}\quad (13)$$

ここで、 λ_{eq} は、次式で与えられる等価波長である。

$$\lambda_{\text{eq}} = \lambda_M \lambda_0 / (\lambda_0 - \lambda_M) \quad (14)$$

また、 $\phi_{\text{eq}}/2\pi$ は、周波数と同じ単位をもち、 ϕ_{eq} は、等価波長 λ_{eq} により折り畳まれた位相である。

ここで求めた ϕ_{eq} は、 λ_0 、 λ_M に対応する波長の位相に誤差がある場合、 $\lambda_{\text{eq}}/\lambda_0$ もしくは、 $\lambda_{\text{eq}}/\lambda_M$ 倍誤差が増幅されてしまう。そこで、この等価波長によりラッピングされた位相 ϕ_{eq} に $\phi(x, y, \lambda_0)$ 、 $\phi(x, y, \lambda_M)$ どちらかの位相を貼り付ける³⁾。この方法は、例えば λ_0 の位相を貼り付ける場合、

$$S(x, y) = \{\lambda_{\text{eq}}\phi_{\text{eq}}(x, y) - \lambda_0\phi(x, y, \lambda_0)\} / 2\pi\lambda_0 \quad (15)$$

を画素ごとに求め、 S を整数値にした後、 $\phi(x, y, \lambda_0)$ を足すというものである。つまり、 $\phi(x, y, \lambda_0)$ を貼り合わせた位相を ϕ'_{eq} とすると、

$$\phi'_{\text{eq}} = \phi(\lambda_0) + \lambda_0 \times (\text{整数}) S(x, y) \quad (16)$$

となり、等価波長で折り畳まれた位相が求まる。

⑤ 周波数解析結果と 2 波長法結果の貼り合わせ

まず、②の周波数解析結果を補正して求めた $N'(x, y)$ と、③で求めた $\phi_{\text{eq}}/2\pi$ から各画素の周波数の整数値 $P(x, y)$ を決定する。つまり、

$$P(x, y) = (\text{整数}) (N'(x, y) - \phi'_{\text{eq}}/2\pi) \quad (17)$$

次に、式 (16) で求めた ϕ'_{eq} を貼り付ける。

$$D''(x, y) = \lambda_{\text{eq}} (P(x, y) + \phi'_{\text{eq}}/2\pi) \quad (18)$$

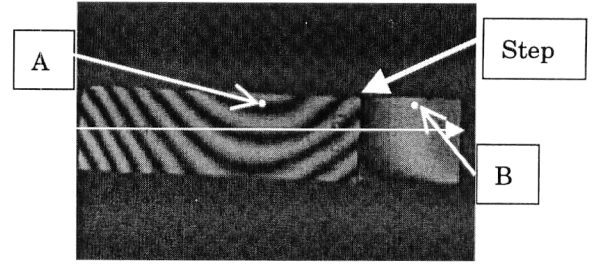


Fig. 4 Interferogram of the step at a wavelength.

以上より、周波数解析結果と位相シフト法の結果を貼り合わせることが可能となる。

3. 実験

Fig. 3 に実験で用いた光学系を示す。光源には、波長が 664~680 nm で可変な半導体レーザー (Velocity, New Focus 製) を用い、出射光を偏波面保存ファイバーに導入する。ここで、分岐型ファイバーを用いて、一方の光を干渉計に、もう一方を波長計に接続する。干渉計側のファイバーから出射した光をまず平行光束にし、発散レンズ、空間フィルターによって発散光とし、100 mmφ、F/3 のコリメーターレンズにより平行光束を作り、基準板、サンプルに照射する。サンプルは、1 mm のゲージブロックを 2 枚貼り合わせた段差サンプルを用いた。

4. 測定結果

波長可変レーザーを用いたフィゾー型干渉計によって得られた波長 665 nm における干渉縞画像を Fig. 4 に示す。ここで、以下で述べる一断面と、画素 A、B の位置も同時に示す。

Fig. 4 で示した中央付近の矢印上の一断面における干渉縞が波長走査に伴いどのように変化するかを Fig. 5(a) に示す。また、Fig. 5(b) に画素 A、B での干渉縞の光強度変化を示す。測定は、波長 665~675 nm で行った。

5. 解析結果

2 章で示した方法で、解析を行った。まず、手順①の方法により Fig. 5(a) で示した一断面を周波数解析した結果と、補正曲線 Fig. 2 を使って補正し、求めた光路長差 (周波数) を Fig. 6 に示す。

この OPD をもとに、2 章③で示した方法により求めた開始波長と終了波長の位相を Fig. 7 に示す。ただし、ここでは、段差を含まない面内で位相接続を行っている。

次に、これら 2 つの位相から 2 章④の方法により求めた等価波長によって折り畳まれた位相を開始波長の位相に貼

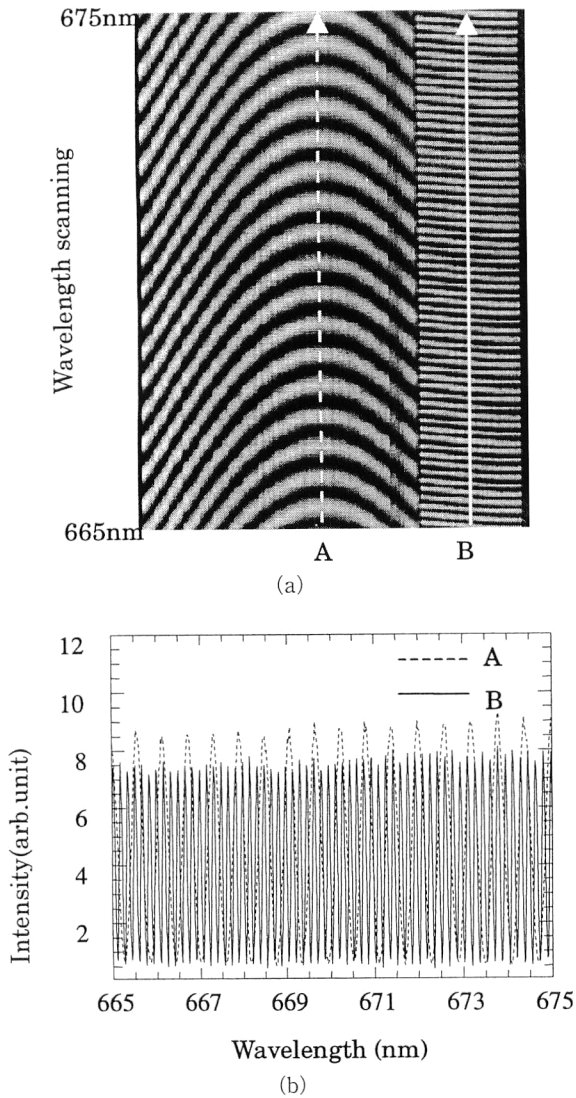


Fig. 5 Wavelength variation of intensity distribution along a line (a), and interferogram at 2 points A and B (b).

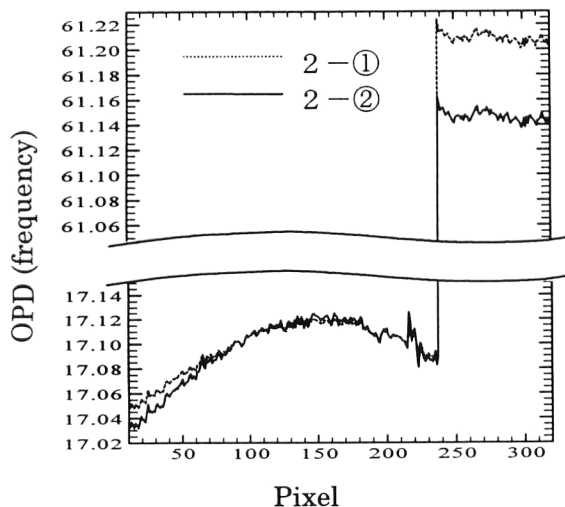


Fig. 6 OPD calculated by 2-① and 2-② method.

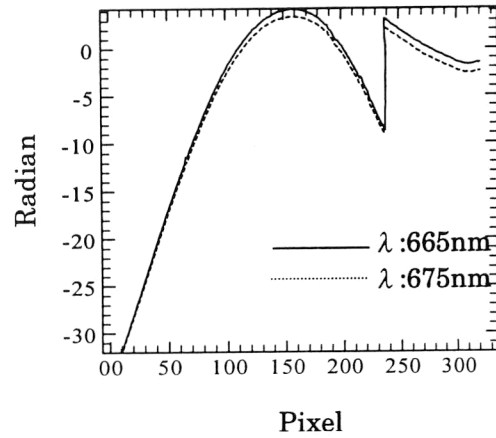


Fig. 7 Profiles of phase at the initial and final wavelengths.

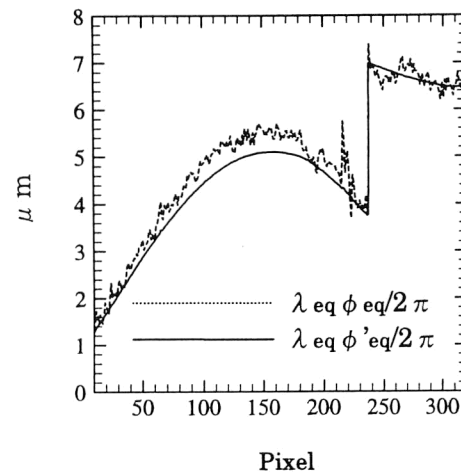


Fig. 8 Results from 2 wavelengths fringe scanning method.

り付けた場合を Fig. 8 にそれぞれ示す。

ここで、Fig. 6 と Fig. 8 を干渉信号の周波数で表し、差を求めると、Fig. 9 に示すように、段差を挟む領域における周波数の整数値が決定できる。よって、それぞれの段差面での整数値に等価波長を掛けたものと、Fig. 8 で示した 2 波長位相シフト法によって求めた結果 (点線) に単波長を用いた位相シフト法の結果を貼り付けたもの (実線) を足すことによって、周波数解析結果に含まれていた、ランダムなノイズのない光路長差を求めることができた。3 回の測定結果を Fig. 10 に示す。これをみると OPD に対し、最大 0.3% の違いが生じている。これは、測定開始と終了時の波長決定精度によるものと考えられる。また、波長を一定にし、測定時間と同じ間隔における干渉縞の変化を確認した結果、サンプルと参照面のステージがわずかに動いており、これも誤差要因とみなされる。

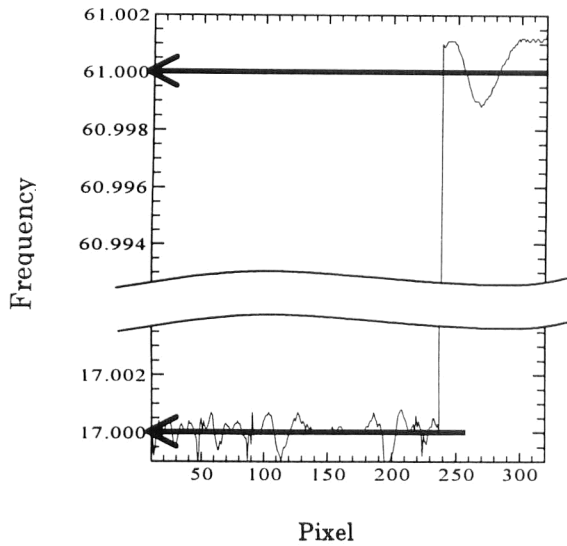


Fig. 9 Integer value of frequency at each faces of step.

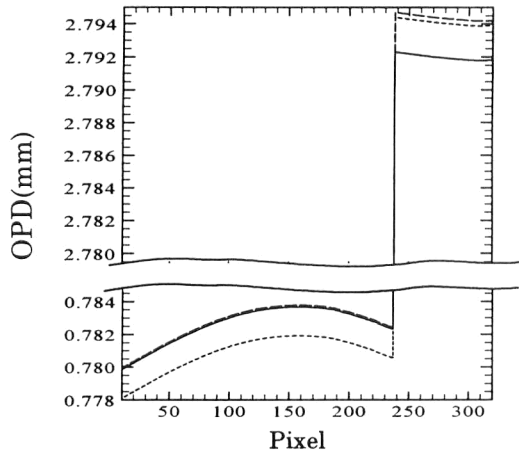


Fig. 10 Profiles of OPD using 2-⑤ from 3 times measurements.

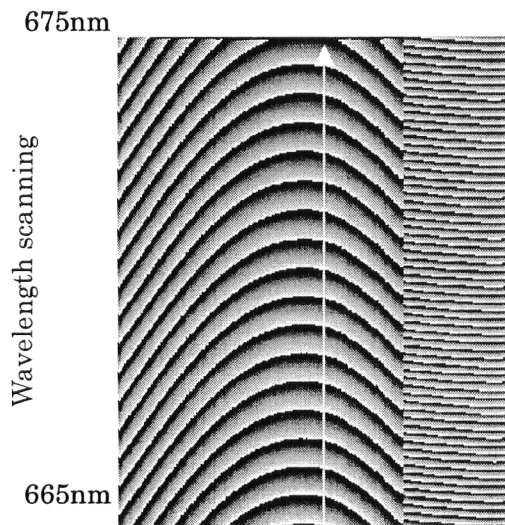


Fig. 11 Phase shift map during wavelength scanning.

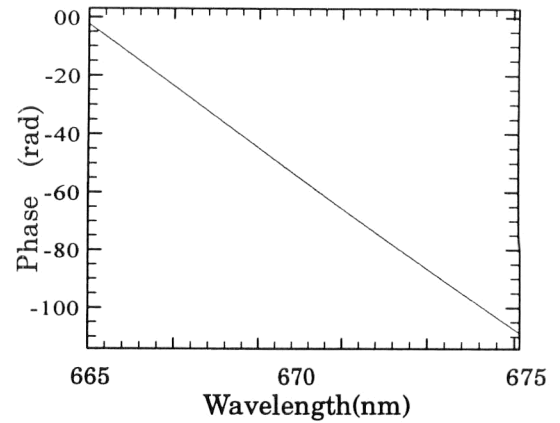


Fig. 12 Phase unwrapped data of one line of Fig. 11.

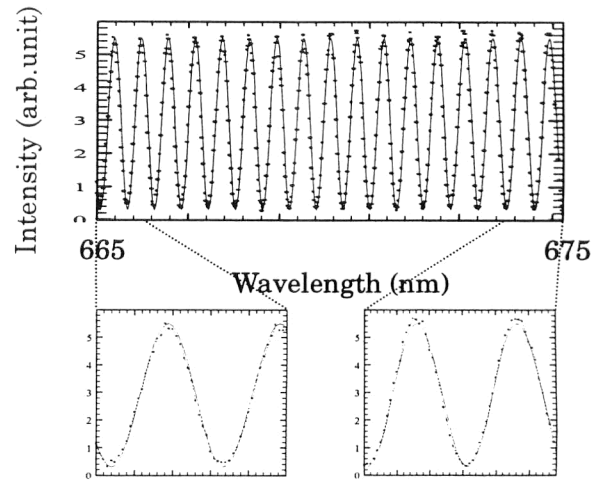


Fig. 13 Interferograms (dotted) and calculated from phase values (solid).

6. 考 察

今回の測定において、波長走査は、一定速度で行われ、それに対し、等時間間隔で画像を取得している。波長走査の速度は、0.05 nm/s であり、10 nm 走査するための測定時間は 200 s であった。

波長を一定速度で走査しながら画像を撮っているため、途中で波長を止めて画像を撮る場合に比べ、波長が安定していることが予想される。波長走査が安定して行われているかどうかを、今回の測定により得られたデータをもとに検討した。

式 (12) を拡張し、波長走査中に得られた任意の s 番目の波長における位相 $\phi_s(x, y) = 2\pi D(x, y) / \lambda_s$ を求めるためには、式 (1) の I_m を用いて、

$$\phi_s(x, y) = \arctan \frac{\sum I_m \sin 2\pi [j(m) - t(s)]}{\sum I_m \cos 2\pi [j(m) - t(s)]}$$

$$j(m) = \frac{Dm\delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 + m\delta\lambda)}$$

$$t(s) = \frac{Ds\delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 + s\delta\lambda)} \quad (19)$$

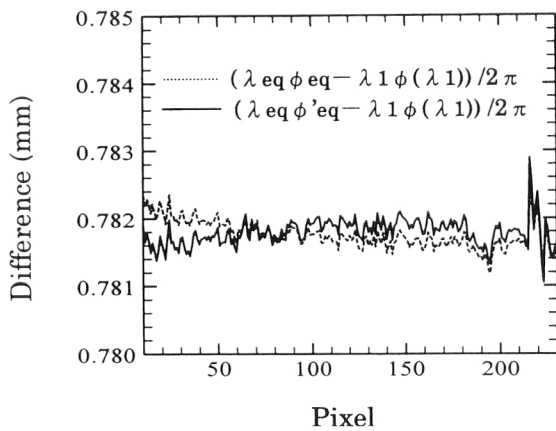


Fig. 14 Differences between FFT method and phase shifting method.

とすればよい。この計算により求めた各位相を Fig. 11 にグレースケールで示し、白線矢印で示した画素の位相に対し位相接続を行った結果を Fig. 12 に示す。

この結果から、波長は滑らかに走査されていることがわかる。また、式 (1) を用いて縞強度に直し、測定結果の縞強度と比較したものが Fig. 13 である。これからわかるように、測定によって得られた干渉縞強度変化と $M+1$ 枚の画像より解析し求めた強度変化がよく一致している。

次に、2章②の誤差関数による補正について考察する。Fig. 6 で示したように、誤差関数で補正する前と後では、OPD 分布が変化している。ここで、OPD が小さい面について考えると、補正の前後で、図の左部分が大きく異なることがわかる。

この補正が正しく行われているのであれば、位相シフト法によって求めた形状 (Fig. 7) と周波数解析結果の差がフラットになるはずである。そこで、これを調べるために、Fig. 6 の ϕ_{eq} と補正後の ϕ'_{eq} から、波長 665 nm における位相 $\phi(\lambda_0)$ を、単位をそろえて差を求め比較したものが Fig. 14 である。この図から、補正前では左部分が跳ね上がっていたものが、補正後にはほぼ平らになっていることがわかる。

7. おわりに

波長走査フィゾー型干渉計において、鏡面段差サンプル形状を、参照面もしくはサンプルの機械的駆動部なしに高分解能な測定を行った。また、今回使用した等波長間隔で走査されるレーザーの特性を考慮した解析を行った。波長走査による測定結果に対し周波数解析と、開始時と終了時の位相に対し位相シフト解析を行い、それぞれの結果を貼り付けることができた。

今回用いた方法では、従来周波数解析のみでは生じていたランダムなノイズ成分を、波長走査開始時の位相を貼り付けることで除去し、高感度な結果を得ている。

しかし、3回の測定における OPD の決定精度は、0.3% の誤差が生じている。これは、開始波長と終了波長の決定精度と、測定時のサンプルと参照面間のわずかな変化によると考えられる。

今後は、波長の決定精度の向上と、この他の誤差要因である測定中のサンプル、参照面の動きを抑制し、高精度な段差測定の実現を目指したい。

文 献

- 1) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Cllagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 2) M. Takeda and T. Abe: "Phase unwrapping by a maximum cross-amplitude spanning tree algorithm; A comparative study," *Opt. Eng.*, **35** (1996) 2345-2351.
- 3) K. Creath: "Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2810-2816.
- 4) T. Dresel, G. Hausler and H. Venzke: "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence rader," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 919-925.
- 5) 山本明弘, 矢野 勝, 山口一郎: "波長走査干渉計による表面形状計測", 第 21 回光波センシング技術研究会講演論文集 (1998) pp. 53-60.
- 6) 加藤純一, 山口一郎: "位相シフト法による波長走査干渉縞の処理とその形状測定への応用", 第 20 回光波センシング技術研究会講演論文集 (1997) pp. 37-43.
- 7) P. S. Fairman, B. K. Ward, B. F. Oreb and D. I. Farrant: "300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1371-1380.