

波長走査干渉計における波長掃引の校正*

郭 志徹** 高増 潔*** 山本明弘† 和田智之†
 洲之内啓† 加瀬 究† 田代英夫†

Calibration of Wavelength Scanning in Wavelength Scanning Interferometer

Chih-Che KUO, Kiyoshi TAKAMASU, Akihiro YAMAMOTO, Tomoyuki WADA,
 Kei SUNOUCHI, Kiwamu KASE and Hideo TASHIRO

A highly accurate, non-destructive and high speeding surface profile measuring system based on wavelength scanning interferometry has been developed. Main components of this system include a compact interferometer based on Michelson interferometry, an electronically tuned Ti: Sapphire laser for wide range wavelength scanning, and a high speeding multi-port CCD camera functioning as a detector. Prior researches have provided evidence that this system is able to measure the surface of an object for a $5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ area up to a measurement range of 1.5 mm within 4 seconds. In addition, the data processing procedures are used to reduce noise and interpolate signal, which improves the depth resolution to the degree of less than $3 \mu\text{m}$. The accuracy of the measurement of wavelength scanning interferometry is directly influenced by the scanning accuracy of wavelength. This study investigates the accuracy of wavelength scanning by employing two methods that are designed for calibrating systematic error. The experimental results are used to evaluate the performance of the two calibrating methods.

Key words: wavelength scanning interferometer, tunable laser, wavelength calibration

1. 緒 言

微細加工技術の進歩に伴い、加工面や光学部品などの表面形状を非接触、非破壊的に評価する技術への要望は高まる一方である。光を用いる形状測定はこのような用途に適した手法である。特に、表面形状測定における波長走査干渉法¹⁾では、連続面や段差面の測定が可能なので対象物の制限が少ない特徴がある。しかし、従来は使用するレーザの波長可変幅が狭かったため、測定分解能が低いことや、波長走査に機械的な手法を使うなどの問題があった。

我々は、高速、高精度な波長走査干渉法を用いた三次元形状測定装置の開発をめざして、広い波長可変幅を特徴とする電子制御波長可変 Ti: Sapphire レーザ^{2) 3)}を光源とした干渉計の研究開発を行っている⁴⁾。このレーザは、完全に電子制御のため、機械的な駆動部がないという利点がある。また、可変範囲が約 100 nm と広帯域のため、専用干渉計および高速 CCD カメラと組み合わせることで、従来低かった波長走査干渉計の分解能を約 $3 \mu\text{m}$ まで大幅に高めることに成功した⁵⁾。また、データ補間法を用い、信号処理の検討によって、データの検出率および奥行き分解能を改善を行った⁶⁾。

本論文では、開発した波長走査干渉計の精度評価を行うために、波長走査干渉法の測定精度に最も深く関る波長の掃引精度について検討し、掃引誤差および波長掃引の校正手法の評価を行った。走査波長の新しい校正方法として、瞬時波長による校正方法を提案し、実験によりその有効性を確認した。

2. 波長走査干渉計

2.1 波長走査干渉法⁷⁾

波長走査干渉計システムを図 1 に示す。本計測システムの干渉計は基本的にマイケルソン型干渉計で構成するため、その干渉信号の強度は次式で与えられる。

$$i(x, y, k) = i_R + i_O + 2\sqrt{i_R i_O} \cos(2kH(x, y)) \quad (1)$$

ここで、 i_R 、 i_O はそれぞれ、参照光および物体光の強度で、 $H(x, y)$ は表面上のある点 (x, y) の基準面からの距離であり、 k は $2\pi/\lambda$ で与えられる波数である。

波長掃引テーブルに基づいて光源の波長（波数）を掃引することにより、干渉パターンが移動する。物体表面の各位置で基準面からの距離に比例した周波数をもつ干渉信号を、高速フーリエ変換で周波数を測定することにより、物体表面の各点で基準面からの絶対距離を独立に決定することができる。

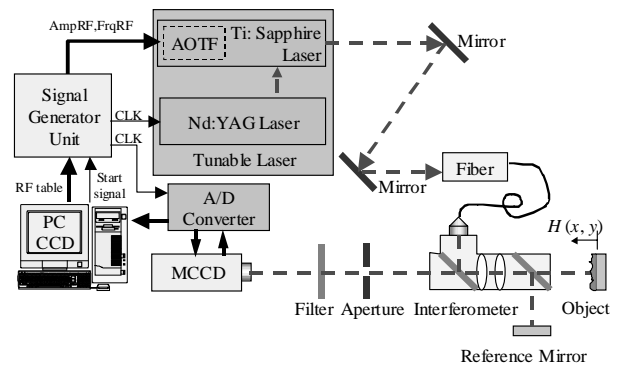


Fig. 1 Configuration of wavelength scanning interferometer consisted with Ti: Sapphire wavelength tunable laser and Michelson interferometer

* 原稿受付 平成 13 年 7 月 13 日
 ** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)
 *** 正会員 東京大学工学系研究科
 † 正会員 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)

式(1)により、波数 k をリニアに走査すると、測定面上のある一点 (x, y) での時系列の干渉信号 $i(n\Delta t)$ (n : 計測番号, Δt : サンプル時間) は H の逆数を周期とする周期関数になる。この時系列の干渉信号 $i(t)$ をフーリエ変換すると、 f_{digit} はパワー・スペクトルのピークとして現れる。

周波数解析により、干渉信号の周波数 f_{digit} を測定し、その絶対距離 H は波数掃引幅により式(2)で得られる。

$$H = \frac{\pi}{\Delta k} f_{\text{digit}} = dh \cdot f_{\text{digit}} \quad (2)$$

最小分解能 dh は、波数掃引の変化量 Δk によって決まり、式(3)で与えられる。

$$dh = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\lambda_{\text{max}} \cdot \lambda_{\text{min}}}{2(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})} \quad (3)$$

ここで、 λ_{max} は波長掃引時の最も長い波長、 λ_{min} は最も短い波長である。式(3)から、奥行き分解能は波長掃引帯域を広げるとともに高くなる。

一方、測定レンジ Δh は、サンプリング定理によって決まり、式(4)のように表せる。

$$\Delta h = \frac{N}{2} dh \quad (4)$$

N は画像のサンプリング枚数である。

3. 波長掃引誤差の検討

波長走査干渉法に基づいて、波長の掃引誤差を含めた掃引波数 $k(t)$ 、測定面上の一点の位相 $\phi(t)$ 、強度 $i(t)$ および振幅スペクトルと時間 t の関係式は以下のように表すことができる。

$$k(t) = a_k(t) \cdot t + k_0 + \delta k(t) \quad (5)$$

$$\phi(t) = 2Hk(t) = 2H(a_k(t) \cdot t + k_0 + \delta k(t)) \quad (6)$$

$$i(t) = i_{\text{dc}} + i_{\text{inf}}(\phi(t)) = i_{\text{dc}} + i_{\text{amp}}(t) \cos(\phi(t)) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} |F\{i_{\text{inf}}(t)\}| &= |F\{i_{\text{amp}}(t) \cos(\phi(t))\}| \\ &= \frac{1}{2} |I_{\text{amp}}[j(\omega - \omega_H)]| + \frac{1}{2} |I_{\text{amp}}[j(\omega + \omega_H)]| \\ &= \frac{1}{2} |I_{\text{amp}}\left[j\left(\omega - 2H \frac{dk(t)}{dt}\right)\right]| + \frac{1}{2} |I_{\text{amp}}\left[j\left(\omega + 2H \frac{dk(t)}{dt}\right)\right]| \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $i_{\text{amp}}(t)$ のフーリエ変換が $I_{\text{amp}}(j\omega)$ である。式(8)から、干渉信号の角周波数 $\omega_H(t)$ は

$$\omega_H(t) = \pm 2H \frac{dk(t)}{dt} = \pm 2H \frac{d}{dt}(a_k(t) \cdot t + \delta k(t)) \quad (9)$$

によって導くことができる。つまり、干渉信号の角周波数は波数掃引関数の微分に絶対距離の2倍をかけたもので、周波数のスペクトル領域で0周波数に対して対称的に表すことができる。しかし、実際の計測信号はサンプリング数 N 、サンプリング周波数 f_s で量子化されているので、干渉信号の量子化周波数 f_{digit} を量子化変数 $n = t f_s$ で置き換えると、

$$f_{\text{digit}} = \pm \frac{NH}{\pi} \frac{dk(n)}{dn} = \pm \frac{NH}{\pi} \frac{d}{dn}(a_k(n) \cdot n + \delta k(n)) \quad (10)$$

となる。そこで、もし $a_k(n)$ と $\delta k(n)$ が定数、すなわち、波数掃引関数が直線であれば、信号の周波数スペクトルは強度のスペクトル $I_{\text{amp}}(j\omega)$ の波形を0周波数の対称に $f_{\text{digit}} = NH a_k / \pi$ だけ周波数がずれることになる。

しかし、 $a_k(n)$ が定数ではなく n の関数になる場合は f_{digit} がステップごとに変わり、信号の周波数スペクトルの波形は崩れてしまい、周波数解析の誤差になる。つまり、 $a_k(n)$ の変動、すなわち、波数掃引関数の非直線性は波長掃引の系統誤差である。この誤差は、4章に提案した波長計による校正法と瞬時周波数による校正法で補正することができる。

一方、 $\delta k(n)$ は波長掃引のランダム誤差を示す。 $d\delta k(n)/dn$ は独立で $a_k(n)$ より極めて小さい場合、ランダムであるため、周波数スペクトルの全域の周波数に干渉信号の周波数よりパワーが極めて小さいノイズとなる。しかし、波数掃引幅に変動を与えるため、信号の周波数にも影響を及ぼす。この誤差は補正できないが、誤差伝播の解析を用いて測定誤差を推定することができる。

4. 波長掃引における系統誤差の校正

4.1 波長計による校正法

従来の波長掃引周波数の校正法では、波長計を用いレーザ

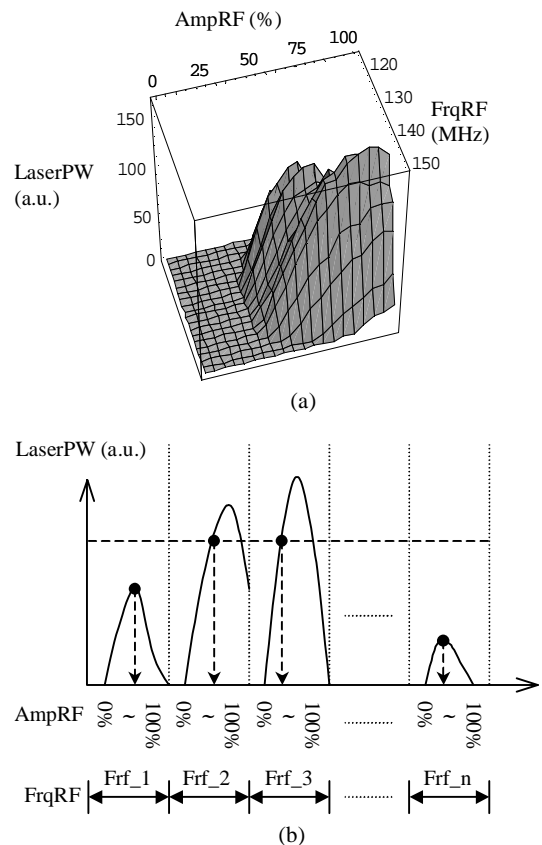


Fig. 2 Laser power calibration, (a) Relationship between RF amplification (AmpRF), RF frequency (FrqRF) and output laser power (LaserPW), (b) Calibration method to decide RF amplification and RF frequency for each laser frequency

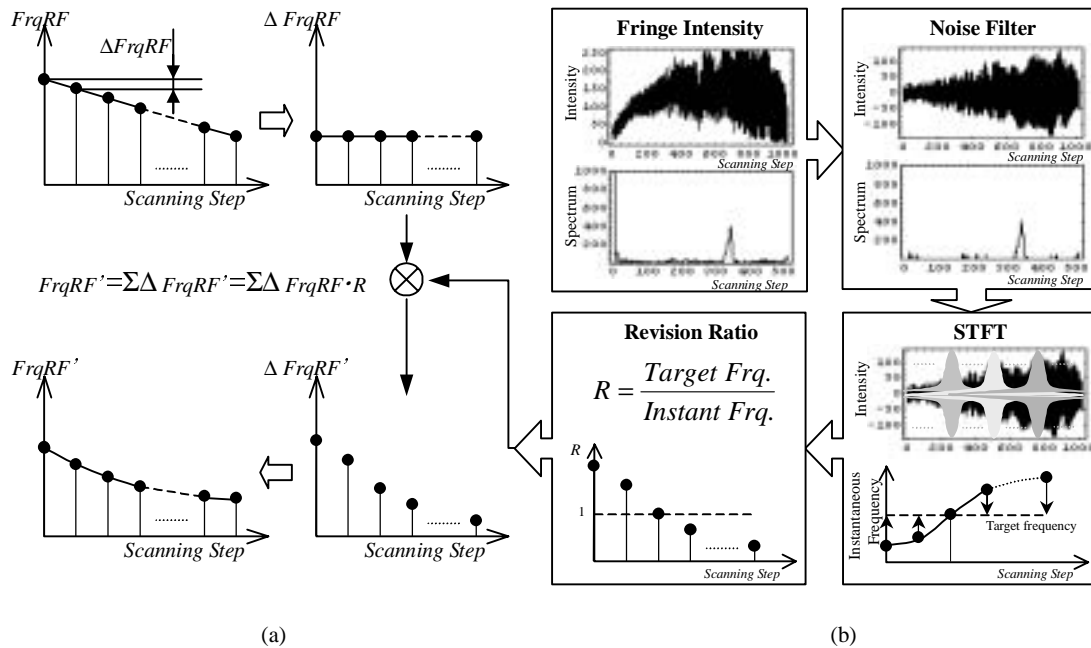


Fig. 3 Processes of wavelength scanning calibration with instantaneous frequency analysis, (a) correction ratio R is calculated from the ratio between target frequency and instantaneous frequency, (b) target frequency is decided from fringe intensity using short-time Fourier transform (STFT)

の波長を制御する RF (Radio Frequency) 装置の周波数および振幅とそれに対応する絶対波長を測定して、波数と RF 周波数 ($FrqRF$) の対照表を作っておく。そして、パワーメータを用い、レーザのパワー (LaserPW) を制御する RF 振幅 (AmpRF) を調整しながら、各 RF 周波数における出力を均一するように RF 振幅を記録する。

以上二組の対照表をまとめ、均一のパワーでの出力の波数とレーザを制御する RF のパラメータの対照表を作る。この対照表に基づいて、決めた範囲内の線形な波数掃引テーブルを自動的に決めることができる。

対照表の点数が多ければ多いほど、波数掃引の精度も上がる。しかし、点数が多くなると、手作業では時間がかかりすぎて補正前後レーザの動作状況や動作環境も変わってしまい、補正する意味がなくなる。もちろんこの補正法の手順は全部自動化することも出来るが、時間のある程度短縮しても、波長計やパワーメータなど余分な設備が必要となる。

4.2 瞬時周波数による自動校正法

従来の波長計による校正方法に対して、新しい自動校正法を提案する。この校正方法は、従来の方法と比べ、計測装置をそのまま使い余計な設備を必要としない特徴があり、すべての校正手順が自動化されるため、校正時間を大幅に短縮することができた。また、波数掃引の精度もより高く補正することができた。

4.2.1 レーザの RF 振幅の補正による掃引強度の校正

まず、レーザの掃引強度を校正するために、干渉計を干渉させないように対象物へのビームを遮断し、平面度がよい参照ミラーからの光を CCD カメラでレーザ出力の強度として補正を行う。発振領域内の RF 周波数ごとに等間隔の RF 振幅を 0% から 100% まで振り、そのテーブルを掃引テーブルとしてレーザを発振させ、CCD カメラをパワーメータとして掃引テーブルに対照する強度を記録する。出力強度 (LaserPW) および RF 振幅と RF 周波数の制御パラメータ (AmpRF および

$FrqRF$) との関係を図 2 (a) に示す。

均一の掃引強度を求めるため、図 2 (b) に示すように、RF 周波数を n 個に区切り、それぞれに対して RF 振幅を 0% から 100% まで変化させて目標の出力強度なる RF 振幅を記録する。目標強度に達しない場合は強度の最大値での RF 振幅をこの RF 周波数の出力点として記録する。これを掃引強度の校正データとする。

4.2.2 レーザの RF 周波数の補正による掃引波数の校正

前述の掃引強度の校正データに基づいて、発振する範囲内に RF の周波数の初値、終値および掃引のステップ数を決め、掃引テーブルが RF の周波数変化をリニアになるように設定

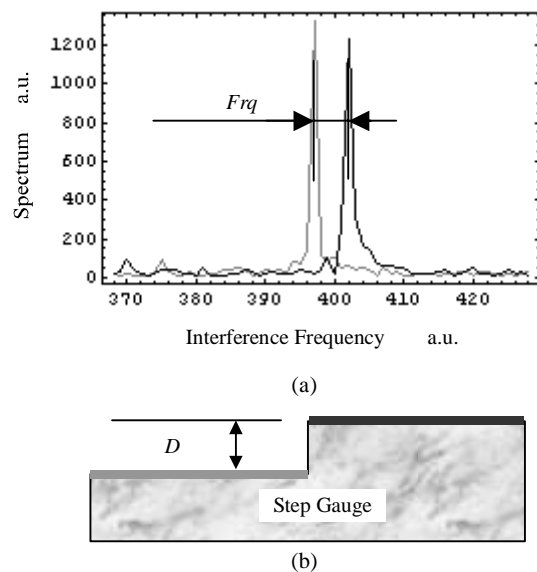


Fig. 4 Calibration of resolution with step-gauge: estimating frequency difference ΔFrq from power spectrum (a) of these two points on each surface of step gauge, resolution is the height difference ΔD divided by ΔFrq

し、レーザを発振させる。

掃引周波数の補正による校正の手順を図 3 に示す。対象物として平面度がよいミラーを用い、定められた高さでレーザを掃引させ、対象物の面上にある一点の干渉信号を取り出す (図 3 (b) Fringe intensity)。この信号を図 3 (b) に示す信号処理のフローに従い、干渉信号にまずフィルタでノイズを濾過して (図 3 (b) Noise filter)、そして瞬間周波数の処理^{8) 9)}で掃引ステップごとの瞬間周波数を求める (図 3 (b) STFT)。ここではノイズ濾過した干渉信号を元にして、窓幅が 256 のハミング窓関数を用い干渉信号を細かく区切って (ウィンドウをスライディングしつつ) フーリエ変換し、パワー・スペクトルのピーク周波数 (掃引ステップごとの瞬間周波数) を求める。

求めた瞬間周波数の分布はレーザ掃引の角速度の分布であり、すなわち、レーザ光源の波数変化の線形性を表す。瞬間周波数の分布が一定に近づけば、レーザ掃引の波数変化は線形に近くなり、干渉信号のスペクトルにおける最大値のピークの波形が崩れず、対象物の表面の高さに対応した位置に鋭いピークとして現れる。

図 3 (a) に示すように、掃引ステップごとの瞬間周波数の分布により、目標周波数が一定させるように補正係数 R を求め、元の掃引テーブル ($FrqRF$) を補正して補正掃引テーブル ($FrqRF'$) を作る。以上の手順を繰り返し、レーザの掃引テーブルを波数線形になるように補正する。

4.2.3 絶対波長および測定分解能の決定

前述の手順によりレーザ掃引の波数リニア性を確保することができるが、絶対波長が分からないため、絶対掃引波長の範囲により決まる測定分解能を求めることができない。

しかし、対象物に段差の高さの値を保証する標準ステップゲージを採用することで、絶対波長および測定分解能を求めることができる。図 4 に示すように、まずステップゲージの平面を干渉計の光軸と垂直になるように調整して、段差のある両平面の測定結果を比べ、ゲージの段差は既知であるので、既知の段差を測定から得られた周波数差で割れば分解能を求めることができる。

$$\Delta h = \frac{\Delta D}{\Delta Frq} \quad (11)$$

以上の校正手順により、掃引される波長が絶対的かつ線形になるように校正することができた。

5. 実験結果

5.1 瞬間周波数による校正結果

新しく提案した瞬間周波数により、掃引波長を校正した前後の比較を図 5 および図 6 に示す。太い線は校正する前の掃引波長で、細い線は校正した後の掃引波長で掃引した結果である。

図 5 では、校正前後における干渉信号スペクトルのピーク波形を示す。校正前は波長にシステム誤差が含まれ、線形に掃引されないため、スペクトル上のピークが広がり、明確なピークが認められないが、校正後では非常に鋭いピークが観察される。図 6 に干渉信号の掃引間に瞬間周波数がどのように変化するかを示している。校正前では、掃引ステップが進むにつれ周波数がだんだん大きくなるような系統的な誤差を持っているが、校正後は、掃引ステップに対してほぼ一

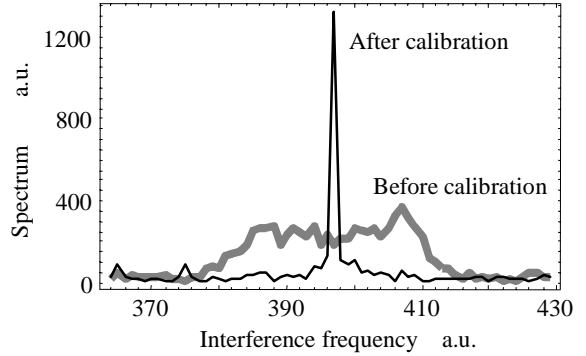


Fig. 5 The spectral peaks of interference frequency by scanning the wavelength tables before calibration and after calibration

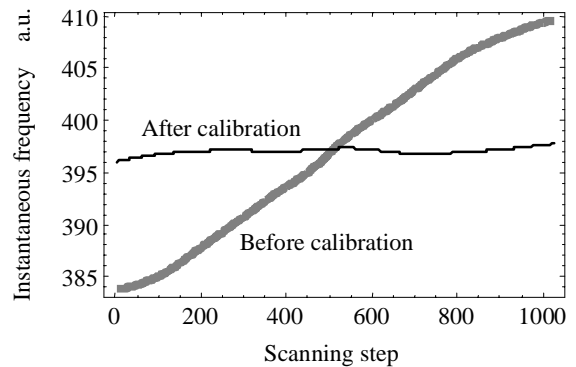


Fig. 6 The instantaneous frequencies of interference frequency by scanning the wavelength tables before calibration and after calibration

定の周波数を示している。

5.2 校正手法の比較

図 7 に前述した 2 つの校正法で補正した掃引波長を用い、同じ絶対高さで測定した結果を示す。絶対高さが約 $264 \mu\text{m}$ のサンプルを測定し、その一点での干渉信号のパワー・スペクトルのピークが絶対高さに対応した干渉信号の周波数 132 の付近 (分解能: $2 \mu\text{m}$) に現れている。太い線は校正前の掃引波長で測定したピークの波形であり、細い破線は波長計による校正、細い実線は瞬間周波数により校正したピーク波形である。掃引の系統誤差があると、そのピークの幅は絶対高さによって広がる。すなわち、掃引の校正精度はピークの半値幅によって評価できる。この例では、瞬間周波数による方法が一番すぐれている。

図 8 に図 7 と同じの絶対高さに対して 2 つの校正方法で補正した掃引波長を用い、測定した干渉信号の瞬間周波数の分布を示す。太い線は校正前の掃引波長で測定した瞬間周波数分布であり、細い破線は波長計による校正、細い実線は瞬間周波数による校正した掃引波長の測定結果である。掃引ステップ全体にわたり、実線の瞬間周波数分布は破線の瞬間周波数分布より小さい標準偏差となる結果を示している。

この校正結果としては、瞬間周波数による校正法は波長計による校正法より高い校正精度を得られた。瞬間周波数による校正では、瞬間周波数分布の標準偏差を 0.17 程度にすることができ、これによる測定誤差は式 (2) から誤差伝播によ

り誤差が $0.34 \mu\text{m}$ 程度と推定される。干渉計の分解能と比較して十分な校正が行えた。

6. 結 言

新しく提案した瞬時周波数による校正方法と段差標準を利用した校正方法により、掃引波長を線形で絶対的に校正できることを示した。比較に用いた波長計による校正法では、波長計で 37 点の波長を用いて行ったが、この結果は、瞬時周波数による校正法より校正精度は低かった。この手法では、校正点数を増えれば、掃引精度ももっと高く得られるが、波長計を装置として一緒に組む必要があるし、校正の効率や精度も波長計の性能に依存するのは大きな欠点となる。

一方、提案した瞬時周波数による校正手法は、特別な装置を必要とせず、校正手続きも比較的簡単に自動化できた。波長の掃引精度は直接に波長走査干渉計の測定精度に影響を与える。実験結果に示すように、瞬時周波数による校正方法では、充分小さい誤差で波長の校正が行うことができた。

波長の掃引精度の検討により、掃引誤差は系統誤差とランダム誤差を二種類に分けて検討した。今回提案した校正システムにより系統誤差を大幅に減らすことができた。最終的な不確かさ評価のためには、ランダム誤差を評価する必要があり、これは、最小二乗法を用い誤差伝播を導くことによって、波長掃引誤差により波長走査干渉計への測定誤差の推定できると考えている。この部分に関しては今後の課題とする。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費による「3次元ファンクショナルデジタイザの研究開発」の一環として行われた。

参 考 文 献

- 1) J. Tsujiuchi, "Interferometry with wavelength change", Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (Proc. SPIE), **1230**, 1990, 325 .
- 2) S. Wada, K. Akagawa, and H. Tashiro, "Electronically tuned Ti:sapphire laser" Opt. Lett. **21**, (1996) 731 .
- 3) J. Geng, S. Wada, Y. Urata, H. Tashiro, "Widely tunable, narrow-linewidth, subnanosecond pulse generation in an electronically tuned Ti:sapphire laser", Opt. Lett. **24**, (1999) 676 .
- 4) C. C. Kuo, A. Yamamoto, K. Sunouchi, S. Wada, K. Kase, K. Takamasu, H. Tashiro, "Wavelength scanning interferometer for surface profile measurement -The influence of scanning modes on wide range wavelength scanning-", 6th International Conference on Automation Technology'2000, (2000) A6-2 .
- 5) 郭 志徹, 山本明弘, 和田智之, 洲之内 啓, 加瀬 究, 田代 英夫, 高増 潔, "波長走査干渉計による表面形状測定(第一報)

超広帯域波長走査", 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, M20, (2000) 594 .

- 6) 郭 志徹, 山本明弘, 和田智之, 洲之内 啓, 加瀬 究, 田代 英夫, 高増 潔, "波長走査干渉計による表面形状測定(第二報) 理論分解能の改善手法の提案", 2000 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, K50, (2000) 482 .
- 7) Yamaguchi, A. Yamamoto, M. Yano, "Surface topography by wavelength scanning interferometry", Opt. Eng. **39** (1), (2000) 46 .
- 8) Henry K.C. Kwok, Douglas L. Jones, "Instantaneous frequency estimation using an adaptive short-time Fourier transform", Proceedings of the 29th Asilomar Conference on Signals, (1996) 543-547 .
- 9) Paul S. Wright, "Short-time Fourier transforms and Wigner-Ville distributions applied to calibration of power frequency harmonic analyzers", IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 48, No.2, (1999) 475-478 .

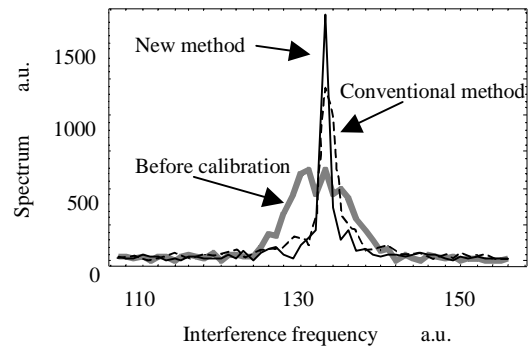


Fig. 7 Comparison of calibration methods with spectral peak by conventional method and new method

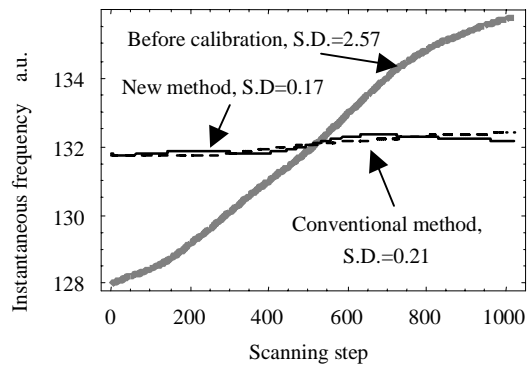


Fig. 8 Comparison of calibration methods with instantaneous frequency by conventional method and new method