

波長走査干渉計における信号処理*

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†

Signal Processing for Wavelength Scanning Interferometer

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

A high accuracy and non-destructive absolute surface profile measuring system based on wavelength scanning interferometer has been developed. This system combined a compact interferometer based on Michelson interferometer with an electronically tuned Ti:sapphire laser for wide range wavelength scanning. This system measures absolute profile of object up to measurement height range of 1.5 mm for area of 2.5 mm × 5 mm. The depth resolution by quantization is approximately 3 μm. For improvement of the system, signal processing methods such as laser intensity revision method, phase revision method and interpolation method are adapted. From laser intensity revision and phase revision by Hanning window, S/N ratio of peak spectrum detection improved from 12.0 to 25.4. Five types of interpolation methods are tested to improve depth resolution. Using variable width cos²θ fitting method, the depth resolution improved up to 0.06 μm. Experiment of profile measurement of Japanese one yen coin is done, and the accuracy of measurement is approximately 2 μm. The experimental results show the signal processing methods are useful for the profile measuring system.

Key words: wavelength scanning interferometer, signal processing, data processing, interpolation method

1. 緒 言

干渉法は等変位線や等高線を容易に得ることができ、形状の定性的な性質を一目で知ることができるが、定量的解析を行なうには、解析に多くの時間を取られる。また、計測の結果から得られたデータを処理解析して、初めて利用可能なデータが得られる場合が多い。特に、近年に多く開発された様々な高精度干渉計測法は、高精度の追求と共にデータ量が増え、解析法も複雑になっている。

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 レーザを光源とした干渉計測装置を開発した¹⁾²⁾。このレーザは、音響光学素子 AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) によって波長を電子的に制御できる。さらに、この干渉計測装置の精度評価を行い、精度が波長の掃引精度に依存することを明らかにし、新しい波長掃引の校正方法を提案し、その効果を確認した³⁾。この三次元形状測定装置は、小型の機械部品、マイクロマシンや光学素子などの三次元絶対形状を測定することを目標とし、波長走査干渉法の特性を生かして、段差などを含む三次元形状のマイクロメータオーダでの計測を目指している。

実際に、開発した波長走査干渉計を有効に利用するには、高精度なデータ処理手法の確立が必要となる。本論文では、波長走査干渉法における信号処理として、レーザ強度および位相不連続の対策、補間法による分解能の改善方法を提案した。さらに、実験により、これらの手法の有効性を確認した。

2. 波長走査干渉法

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⁴⁾。

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

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) の基準面からの絶対距離であり、 k は $2\pi/\lambda$ で与えられる波数である。

波数 k をリニアに掃引させると、干渉信号の強度 $i(x, y)$ が絶対距離 $H(x, y)$ に比例する周期で変化するため、干渉信号を周波数分析することで、絶対距離が計算できる。記録した干渉画像のすべての点に同じ手順で絶対距離を求めれば、対象物の三次元絶対形状が得られる。

今回の実験における仕様を表 1 に示す。2.5 mm × 5 mm の測定範囲に対して、波長を 740 nm から 842.3 nm まで波数

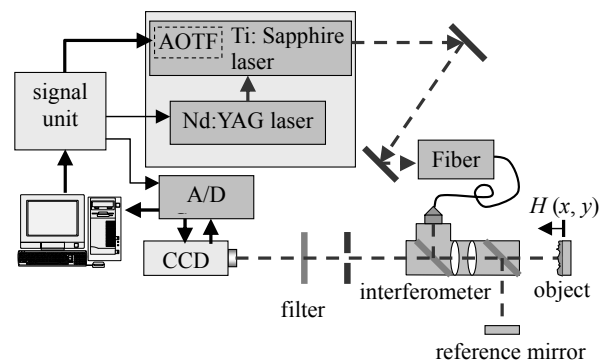


Fig. 1 Configuration of wavelength scanning interferometer consisted with Ti: Sapphire wavelength tunable laser and Michelson interferometer

* 原稿受付 平成 14 年 7 月 12 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
 † 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)
 †† 正会員 理化学研究所

がりニアになるように掃引し、1024 枚の干渉画像を得て、それから三次元形状を求めている。光軸方向の測定範囲は約 1.5 mm とである。

3. レーザ強度および位相不連続の対策

3.1 レーザ強度補正

波長ごとにレーザ出力が変動することに対する対策がレーザ強度補正である。レーザ強度補正は全フレーム画像の強度をなるべく一定になるよう補正するための処理である。このシステムでは、校正段階でレーザ出力ができるだけ均一になるように、AOTF を駆動する RF (Radio Frequency) 振幅が校正されている³⁾。しかし、実際の測定ではレーザ強度はかなり変化し、出力レーザ光の強度を直接測定するセンサがついていないことと、レンズ系などの影響も考慮するために、測定結果からレーザ強度補正を行うこととした。

ここで、どのフレームでも、その平均強度がレーザ強度を表していることを仮定した。フレームごとに平均強度を計算し、最初のフレームから最後のフレームまで全体の強度平均値を得る。全体の強度平均値と各フレームの平均値の割合をフレームごとの補正值として、同一フレームのすべてのピクセルの強度と乗算して、強度補正を行った。

3.2 位相不連続補正

周波数解析に使われているフーリエ変換は、対象となっている信号が有限の長さである場合は、最初と最後の信号が連続であることを仮定している。実際には、高さの絶対距離が高さ分解能の非整数倍になった場合には、干渉信号の最初の位相と最後の位相に不連続点が生じ、スペクトルの誤差となって現われる。この影響によるフーリエ変換処理の誤差を出来るだけ少なく抑えるために窓関数処理を行った。

一般に、ハニング窓、ブラックマン窓、ハミング窓などがそれぞれの解析に対応して使われている。本研究では、実験データに各窓関数を適応して、誤差の SN 比より使用する窓関数を選択した。

3.3 実験データの補正結果

レーザ強度補正と位相不連続補正の効果を確認するための実験を行った。レーザ強度補正を行った場合と行わなかった場合の比較および窓関数を適用した場合と適用しなかった場合の比較を図 2 に示す。窓関数としては、一番効果のあったハニング窓の例を示した。図 2 の (a) は波長走査を行って得られた 1024 枚の画像からある 1 点の輝度変化を取り出したものである。(b) はハニング窓をかけたデータ、(c) はレーザ強度補正を行ったデータ、(d) はハニング窓とレーザ強度補正の両方を行ったデータである。

これらのデータからフーリエ変換で求めたパワースペクトルのピークの信号強度と 0 次を除く他のスペクトルの平均信号強度の比を SN 比として求めた。この SN 比の値は図 2 にそれぞれ示した。レーザ強度補正と窓関数の処理により、ピーク周波数を求める SN 比を 12.0 から 25.4 に大幅に改善することができた。この手法により、ノイズに対して強いデータ処理が可能となった。

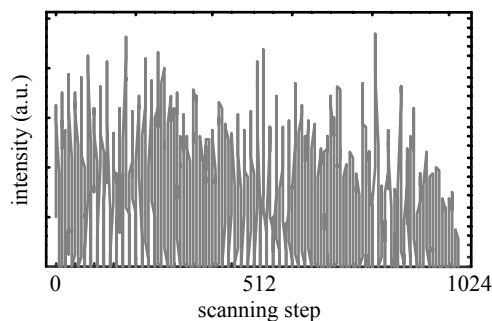
4. 補間法による奥行き分解能の改善

4.1 周波数の分解能

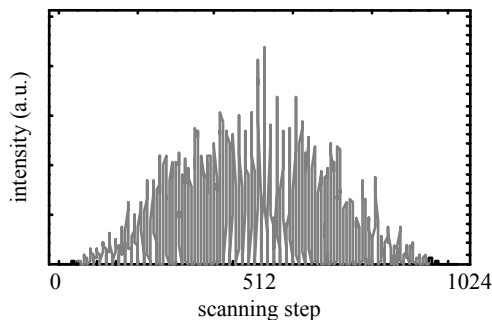
波長走査干渉法の基本原理により、高さ情報は干渉信号の周波数に比例するので、干渉信号の振幅スペクトルのピーク

Table 1 Experimental conditions

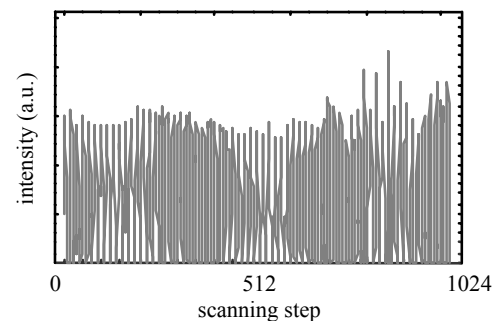
Measuring area (X and Y)	2.5 mm × 5.0 mm
Scanning wave length	740 nm - 842.3 nm
Width of scanning	102.3 nm
Height resolution without interpolation	3.046 μm
Number of images	1024
Height range (Z)	1.56 mm



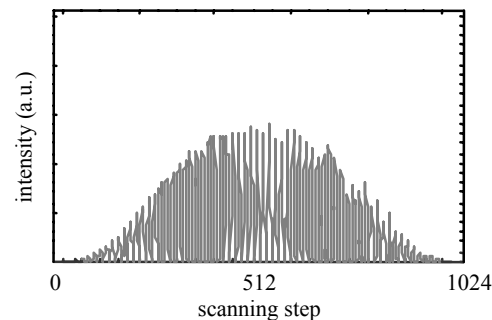
(a) Original intensity (S/N ratio = 12.0)



(b) Phase revision (S/N ratio = 20.1)



(c) Intensity revision (S/N ratio = 13.6)



(d) Phase and intensity revision (S/N ratio = 25.4)

Fig. 2 Comparison of the processing results of intensity revision and phase revision with S/N ratio for detecting peak frequency after Fourier transform

周波数からその場所の絶対高さが計算できる．しかし、離散化された干渉信号をフーリエ変換して、そのピーク周波数を求めると、求められるピーク周波数も離散的なものになり、高さ情報も離散的になる．このときの高さ情報の分解能は、式(2)によって計算される．

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

ここで、 Δk は波数の掃引幅であり、 λ_{\max} は掃引時の最も長い波長、 λ_{\min} は最も短い波長である．今回の実験では、従来よりも広い波長走査範囲を持つレーザを使用しているが、式(2)で計算される高さ情報の分解能は $3.046 \mu\text{m}$ となり、目的とするマイクロマシンや小型光学部品を測定するためには十分な分解能とならない．このため、周波数分解能を向上させる補間法が必要となる．

4.2 周波数の補間手法

図3は、スペクトルが最大となる周波数 f_{peak} を求める5つの補間方法を示している．本研究で用いたレーザは、掃引幅が大きく、前報で新しく開発した校正手法³⁾により掃引精度が大幅に向上している．このため、スペクトルの広がりも充分小さい、さらに、データ処理の速度および精度のバランスから離散的なスペクトルの最大値を示す f_{max} とその前後の3つのデータからピークスペクトルを求めることを行った．ここで、 $SP(f)$ は周波数 f でのスペクトルの大きさを表す．

4.2.1 最大値法

最大値法は、補間を行わない周波数検出の基本方法で、振幅スペクトルの最大値である周波数 f_{max} をピークの位置 f_{peak} として検出する方法である(図3(a))．前述したように、この方法ではかなり広い波長走査を行っても分解能はマイクロメートルオーダーとなる．図4(a)は、平面度がよい鏡面ミラーを約 0.04 度傾けて測定した高さデータの一部を示す．最大値法で測定すると、量子化誤差により、高さ分解能である約 $3 \mu\text{m}$ ごとの階段状の形として測定される．

離散的なデータに補間法を用いて連続的な曲線を補間する手法として、流体解析に関する研究⁷⁾⁸⁾が知られている．少量データの周波数解析で適切な補間法を用いることによって、高い周波数の分解能を得るこの手法が種々の分野で有効である．本研究では、この成果を応用し、以下の4つのタイプの三点補間法を検討した．

4.2.2 二等辺三角形法

最大値およびその前後二点を二等辺三角形の両辺に当てはめて、その三角の頂点の位置を補間したピークの位置として検出する方法である．(図3(b))

$$f_{\text{peak}} = f_{\text{max}} + \frac{SP(f_{\text{max}}+1) - SP(f_{\text{max}}-1)}{2SP(f_{\text{max}}) - 2SP(f_{\text{max}}-1)} \quad (3)$$

4.2.3 放物線法

最大値およびその前後二点を放物線に当てはめ、その放物線の頂点の位置を補間したピークの位置として検出する方法である．(図3(c))

$$f_{\text{peak}} = f_{\text{max}} + \frac{SP(f_{\text{max}}+1) - SP(f_{\text{max}}-1)}{4SP(f_{\text{max}}) - 2SP(f_{\text{max}}-1) - 2SP(f_{\text{max}}+1)} \quad (4)$$

4.2.4 ガウス曲線法

最大値およびその前後二点を式(5)で示すガウス曲線とし

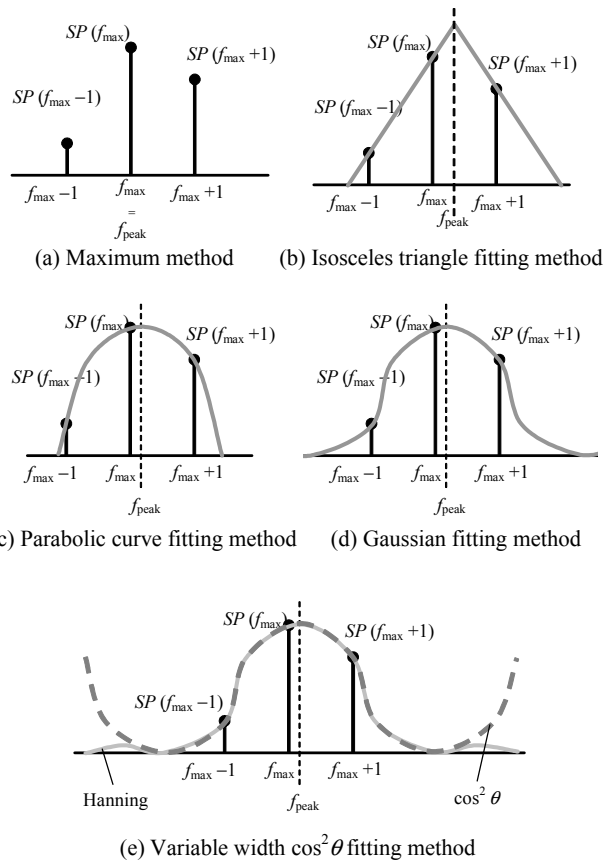


Fig. 3 Five types of interpolation methods

て当てはめ、得られた頂点の位置を補間したピークの位置として検出する方法である．(図3(d)) 三点のスペクトル値の対数から式(6)のようにピーク位置が計算できる．

$$SP(f) = Ae^{-B(f-f_{\text{peak}})^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S(f_{\text{max}}) &= \ln(SP(f_{\text{max}})) = A - B(f_{\text{max}} - f_{\text{peak}})^2 \\ S(f_{\text{max}} \pm 1) &= \ln(SP(f_{\text{max}} \pm 1)) = A - B(f_{\text{max}} \pm f_{\text{peak}})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_{\text{peak}} = f_{\text{max}} + \frac{S(f_{\text{max}}-1) - S(f_{\text{max}}+1)}{2S(f_{\text{max}}-1) + 2S(f_{\text{max}}+1) - 4S(f_{\text{max}})}$$

4.2.5 余弦曲線法

図3(e)に示すように振幅スペクトルにおいて、ハニング窓関数のメインローブ部(実線)と $\cos^2 \theta$ 曲線の山部(破線)は似ているため、 θ をうまく調整すればよいあてはめが得られる．この補間法は余弦関数の二乗曲線を用いてハニング窓で処理した信号の振幅スペクトルをあてはめる．振幅スペクトル上に最大値およびその前後二点を式(7)のように定義する．ここで θ_s は振幅スペクトルの最大値に対比するメインローブからの位相オフセットで、 $\Delta \theta$ は周波数間隔に対比する位相間隔である．

$$\begin{aligned} SP(f_{\text{max}}) &= A \cos^2(\theta_s) \\ SP(f_{\text{max}} \pm 1) &= A \cos^2(\theta_s \pm \Delta \theta) \\ \tan \theta_s &= \frac{S(f_{\text{max}}+1) - S(f_{\text{max}}-1)}{2S(f_{\text{max}}) \sqrt{1 - \left(\frac{S(f_{\text{max}}+1) + S(f_{\text{max}}-1)}{S(f_{\text{max}})} \right)^2}} \quad (7) \\ \cos \Delta \theta &= \frac{S(f_{\text{max}}-1) + S(f_{\text{max}}+1)}{2S(f_{\text{max}})} \end{aligned}$$

ここで, $S(f)^2 = SP(f)$ である.
補間したピークの位置は式(8)で計算できる.

$$f_{\text{peak}} = f_{\text{max}} + \frac{\theta_s}{\Delta\theta} \quad (8)$$

4.3 シミュレーションと実験データの補間結果

窓関数と補間手法の関係について, シミュレーションを行った. 表2にシミュレーションの結果を示す. 使用した窓関数と補間方法により, 誤差の標準偏差が大きく変化することが分かる. 最もよい結果は, ハニング窓と余弦曲線法を利用した場合, ブラックマン窓と余弦曲線法を適用した場合などで, 量子化単位の 1/100 程度の分解能で測定が可能であることが分かった.

手法の物理的な意味や本装置の誤差との関係などの詳細な解析が必要であるが, 誤差モデルなどが明確でないため, 今後の課題とする. 誤差としては波長校正による誤差が最も大きく, 測定物の絶対高さの 0.5 ~ 1%程度⁸⁾となっている. このため, 現時点では量子化単位の 1/100 程度の分解能は十分な分解能といえる.

図4は, 実際の形状に応用した例である. 前述したように, 平面度がよい鏡面ミラーを約 0.04 度傾いて測定した高さデータの一部分である. 最大値法で測定すると, 量子化誤差により, 高さ分解能である約 3 μm ほどの階段状の形として測定される. 一方, ハニング窓と放物線法を用いた場合は, 量子化誤差の 0.040 倍, ハニング窓とガウス曲線法, 余弦曲線法を用いた場合は, 量子化誤差の 0.020 倍, 0.019 倍となり, シミュレーション結果とほぼ同様な値と傾向を示した. これは, この実験条件では 0.06 μm の分解能に相当する.

5. 測定例

図5に示した測定例は1円玉の形状を測定したものである. このような小さく, 鏡面でない形状でかつ段差があるようなものに対して, 本手法では絶対的な形状を簡単に測定できる. 表1に示したように, この装置では1回の測定で 2.5 mm × 5 mm の範囲しか測定できないため, 50%重なるようにして測定範囲を X 方向にずらしながら 11 回の測定を行い, 15 mm × 5 mm の範囲を測定した. データ処理は, レーザ強度補正, ハニング窓および余弦曲線法を用いた後, 11 枚のデータを重なる部分の傾きと位置が一致するように張り合わせた.

測定結果の高さ分布図を図5(a)に, Y軸が 2.5 mm での断面図を図5(b)に示す. 測定結果を触針式形状測定器で測定した値と比較した結果, 全体では標準偏差で 2.2 μm の違いがあった. 部分な細かい形状は, 1 μm 以下でよく一致している. これは, 最大高さ約 0.2 mm の 1%程度の誤差でレーザ波長の校正による影響として説明できる.

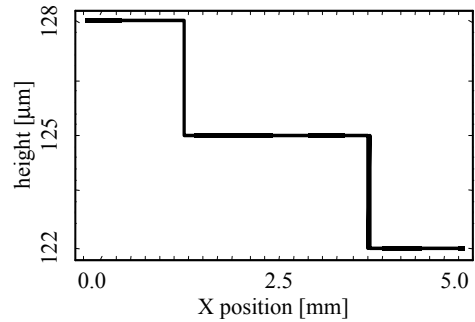
6. 結 言

波長走査干渉法における信号処理として, 波長掃引した連続の干渉信号のノイズの減少処理や信号の解析及び分解能の改善法などについて述べ以下の結論を得た.

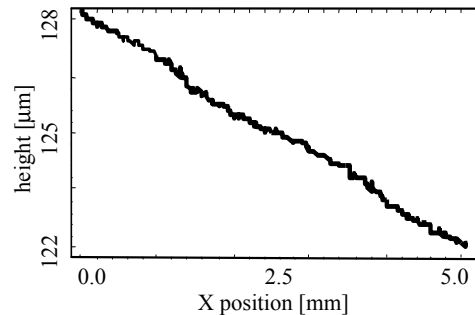
- (1) レーザ強度補正として, 干渉信号の強度を各画像の平均強度が一定になるように処理した. この処理によって信号の SN 比を改善することを実験的に証明した.
- (2) 窓関数を用い位相の不連続を補正し, 信号の SN 比を更に高められることを実験的に証明した. ハニング窓によ

Table 2 Standard deviation of simulation error of interpolation methods with window functions (unit: $dh = 3 \mu\text{m}$)

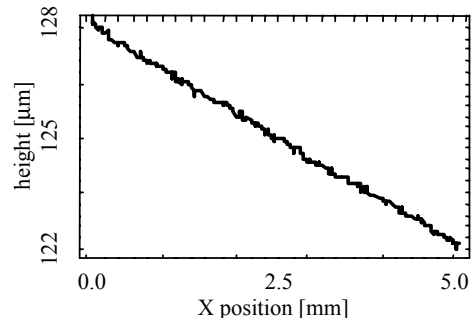
Interpolation method	Window type			
	No	Hanning	Blackman	Hamming
Maximum	0.50	0.50	0.50	0.50
Parabolic curve	0.24	0.05	0.04	0.07
Isosceles triangle	0.17	0.04	0.05	0.03
Gaussian	0.17	0.02	0.01	0.02
Variable width $\cos^2\theta$	0.20	0.01	0.01	0.02



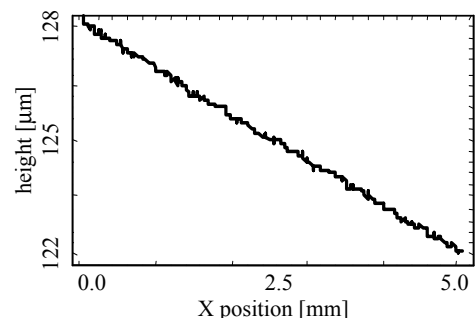
(a) Maximum method ($\sigma=0.500$)



(b) Parabolic curve fitting method ($\sigma=0.040$)



(b) Gaussian method ($\sigma=0.020$)



(d) Variable width $\cos^2\theta$ fitting method ($\sigma=0.019$)

Fig. 4 Experimental results by interpolation methods with Hanning window (unit: $dh = 3 \mu\text{m}$)

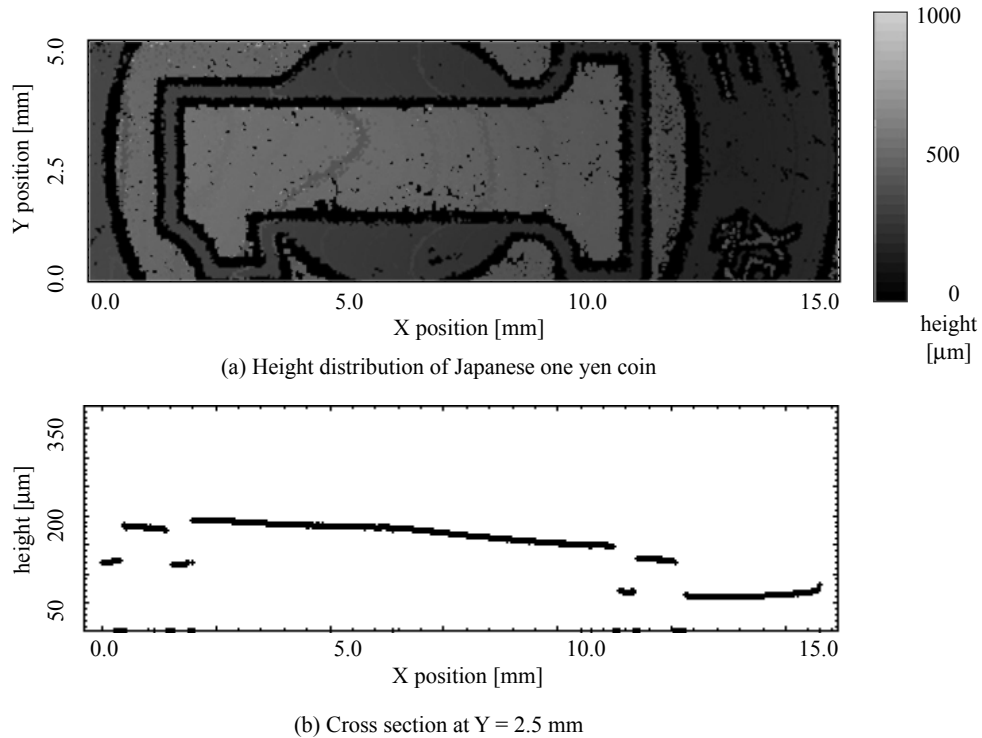


Fig. 5 Measuring example of Japanese one yen coin, scanning area 5 mm × 15 mm and height 50 - 350 μm

る処理が補正方法として適していることが分かった。

- (3) 高さ測定の分解能を向上するために、周波数解析に補間法を用いた。干渉信号のピーク波形を三点補間法によって処理することで、信号の処理速度を落とさず波長走査干渉法の分解能を改善することが出来た。
- (4) 特に余弦曲線法を適用することで、シミュレーションにより高さ測定の分解能を量子化分解能の 1/100 倍程度に向上できることを示した。実験により 0.06 μm の分解能を得られた。
- (5) 実際に 1 円玉の測定を行い、高さの 1% 程度の測定精度で段差を含む絶対形状が測定可能なことを示した。

以上のように、波長走査干渉計に対する信号処理手法を確立した。今後は、より詳細な精度評価を行うために、精密なレーザ波長の校正方法などの研究や対象物の影響などの詳細な評価が必要となる。

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ルの研究開発」の一環として行われた。

参 考 文 献

- 1) S. Wada, K. Akagawa, and H. Tashiro, "Electronically tuned Ti:sapphire laser" Opt. Lett. **21**, (1996) 731.
- 2) 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.
- 3) 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: 波長走査干渉計における波長掃引の校正, 精密工学会誌, **68**, 3 (2002) 392.
- 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 ICAT'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: 波長走査干渉法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 (2000) 482.
- 6) D. Matovic, C. Tropea: Spectral peak interpolation with application to LDA signal processing, Meas. Sci. Technol. **2**, 11 (1991) 1100.
- 7) M. Azzazy, R. L. Potts, L. Zhou, and B. Rosow: "Flow-velocity measurements with a laser diode array", Applied Optics, **36**, 12 (1997) 2721.
- 8) 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: 波長走査干渉法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 (2000) 482.