

超広帯域波長走査干渉計

洲之内 啓・郭 志 徹・山本 明弘・和田 智之
加瀬 究・山口 一郎・田代 英夫

レーザー干渉計による物体表面形状の測定はナノメートル級の精度が得られる反面、測定対象が1/2波長を超える段差を含む場合にその値を確定することができない。このため、立体形状の測定手法としては制約が大きい。また、対象表面が粗面である場合にはスペックルによって干渉縞が乱されて測定不能となる。これらの問題を解決し、高精度で広範囲の絶対値測定が可能な手法として波長走査干渉計が提案されている¹⁻⁹⁾。この方法によれば各点に対して高さの絶対値が求められ任意形状測定に適しているが、高い分解能を得るためには広帯域の連続可変波長光源が必要となる。従来波長走査干渉法の光源には色素レーザー¹⁻³⁾、電流変調型半導体レーザー⁵⁾、外部共振器型半導体レーザー⁶⁻⁸⁾のみならず液晶を用いたファブリー・ペロー型可変フィルターによって白色光から取り出した単色光源⁹⁾が使用されているが、いずれも問題を抱えている。電流変調型半導体レーザーは精密な波長走査が可能であるがモードホップのない連続走査範囲が5 nm以下と狭い。色素レーザーは数十 nmの波長走査が可能であるが出力安定性や操作性に問題がある。また、色素レーザーや外部共振器型半導体レーザーは回折格子などの波長選択素子を機械的に動かす必要があり、必要な波長走査の精度と速度を同時に満たすことができない。実際にこれまでの報告例では実用的な走査幅は最大25 nm程度であって、高さ分解能は10数 μm が限界であった。

現在理化学研究所では新しく開発した広帯域の波長可変レーザーを光源として波長走査干渉法による3次元形状計測装置を開発している。光子響素子を用いて電子制御で波長を選択するチタンサファイアレーザー¹⁰⁻¹²⁾により、300 nmにわたる波長範囲において波数空間で直線的な走査を

高速に行うことが可能となった。この光源の特性に合わせて色収差が少なく被写界深度の深い光学系、高感度と高速性を両立したマルチポート CCD (charge coupled device) カメラ、干渉縞の周波数解析を行う専用並列計算機を併せて開発して計測システムの試作を行っている。現在までに100 nmの波長走査を使って5 mm \times 5 mmの視野で面内分解能10 μm 、高さ分解能1 μm を達成することができた。

1. 波長走査干渉法の原理

2光束干渉計において、光路差を ΔL 、波長を λ とすると干渉条件は

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = n \quad (1)$$

で表される。ここで n は次数である。与えられた ΔL に対して波長を走査する場合、式(1)より波数 $1/\lambda$ が直線的に変化するように波長走査を行うと等間隔に干渉条件が変化する。 λ_{\min} から λ_{\max} まで波長を走査したときに現れる縞の数を周波数 F とすると、 F は

$$F = \Delta L \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) \quad (2)$$

となる。画像の撮影枚数を N とするとサンプリング定理より F の測定可能範囲は

$$0 < F < \frac{N}{2} \quad (3)$$

に制限され、光路差の測定範囲は

$$0 < \Delta L < \frac{N}{2} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right)^{-1} \quad (4)$$

となる。高さ分解能 δh は周波数分解能 δF によって決まり、

$$\delta h = \frac{\delta F}{2} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right)^{-1} \quad (5)$$

となる。したがって高さ分解能を向上させるためには波長

理化学研究所 3DFD 開発チーム (〒351-0198 和光市広沢 2-1)
E-mail: sunouchi@postman.riken.go.jp

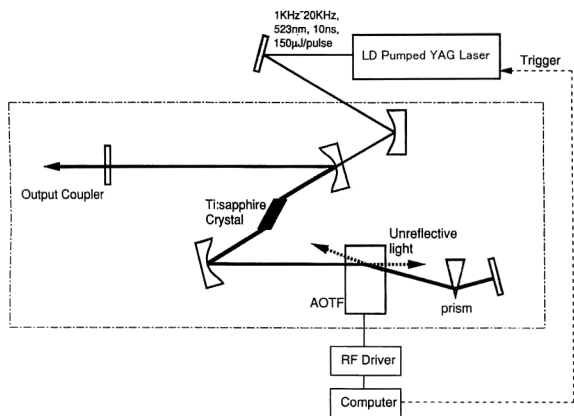


図1 電子制御波長可変チタンサファイアレーザーの構成図。

走査範囲を広くとる、あるいは周波数分解能を高くする必要があり、測定限界に近い高周波数の干渉縞を正確に発生させるためには光源がサンプリング間隔に対して十分小さい誤差で波長を設定する必要がある。また、光源のスペクトル線幅がサンプリング間隔に対して十分狭くない場合には干渉縞のコントラストが低下する。一方、結像光学系の被写界深度が高さ測定範囲を上回っていないと面内分解能が低下する。これらの要素を考慮して波長走査干渉計を設計する必要がある。

2. 実験装置

2.1 広帯域波長可変レーザー

音響光学素子を用いて波長選択を行うチタンサファイアレーザーを図1に示す。励起にはダイオード励起 YAG (yttrium aluminum garnet) レーザーの2倍高調波を用い、Qスイッチによるパルス発振としている。この励起光をチタンサファイア結晶に入射させ、Z型共振器によってレーザー発振させている。共振器中に音響光学素子を用いた波長選択素子 AOTF (acousto-optic tunable filter) を挿入し 109~160 MHz の RF (radio frequency) 信号によって振動させる。この RF 信号の周波数によって AOTF による回折波長を選択してレーザーの発振波長を制御することができる。共振器中に置かれたプリズムは AOTF により同調された光の光路変化を補償するためのものである。回折格子などを機械的に動かして波長選択を行う従来の波長可変レーザーと比べて同調に要する時間が非常に短く、バックラッシュによる再現性の悪化とも無縁である。このため、10 kHz 以上の繰り返し速度において1パルスごとに自由に発振波長を選択することが可能となり、コンピュータ制御の RF 信号発生器を用いて各パルスの発振波長を数値的に設定することによって非線形な波長走査を自由に行うこともできる。発振可能な波長範囲は

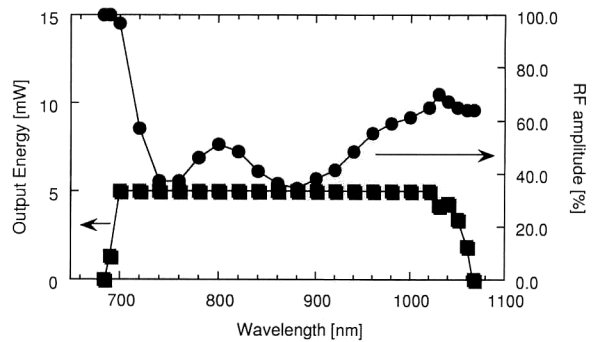


図2 波長可変レーザーの出力特性。AOTF に投入する RF 信号の強度を波長ごとに変えて広い範囲で出力を一定化している。

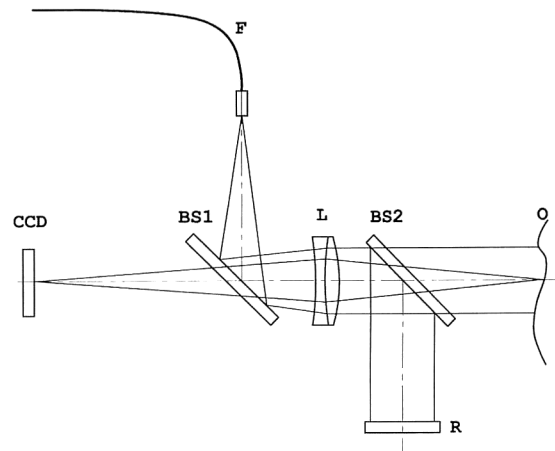


図3 干渉計の光学系。F: 光ファイバー, BS1, BS2: ビームスプリッター, L: レンズ, O: 被測定物, R: 参照面, CCD: 受光素子。

680~1056 nm, 出力は波長 830 nm において 40 mW を達成している。また AOTF に加える RF 信号の振幅を制御することによって回折効率を変化させて1パルスごとに出力を調整することが可能で、図2に示すように広い波長範囲において一定の出力を維持することができる。この出力特性は数値制御で任意に変更できるため、光学系の透過率、対象の反射率、受光素子の感度が掛け合わさった全体の分光感度特性を補償してノイズの少ない一定振幅の干渉縞を得ることができる。光学素子の不要反射による干渉ノイズを避けるためにコヒーレンス長は約 5 mm としているが、共振器内にエタロンを追加する等の処置によりさらに線幅を狭くすることも可能である。

本レーザーは YAG レーザーとチタンサファイアレーザーがそれぞれ平面形で A4 サイズの筐体に組み込まれており、小型で設置が容易である。

2.2 光学系

光学系は図3に示すように光源側のコリメーターレンズと結像レンズを兼用してビームスプリッターを分割したマ

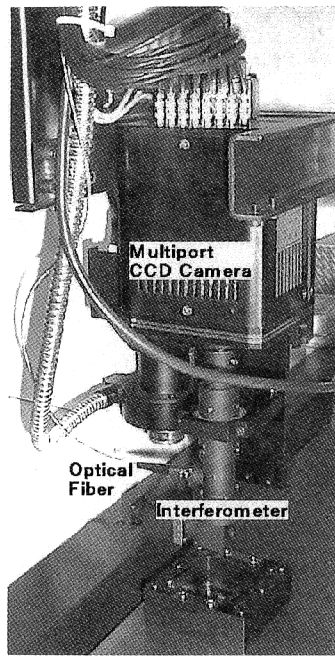


図4 干渉計とマルチポート CCD カメラ。

イケルソン型干渉計である。可動式の架台に載せて移動しながら測定するために小型軽量化を狙っており、ワーキングディスタンスを大きくとることも求められる。結像倍率は2.4倍、受光素子の全域に対応する5.12×5.12 mmの範囲をカバーする視野をもつ。同時測定範囲2 mmを目標として、この範囲の被写体に対して面内解像度10 μmを維持できる被写界深度をもつように設計されている。レーザーの発振波長域で100 nmの波長走査に対して像のずれが1画素以内に収まるように色収差を補正することに成功した。レーザー光はシングルモードの光ファイバーを用いて導入する。マルチポート CCD カメラと結合して架台に装着した状態を図4に示す。

2.3 マルチポート CCD カメラ

高さ測定範囲を大きくするためには撮影する画像の数が多くなるため、1画像の撮影に要する時間が計測時間に大きく影響する。一方、対象の反射率がある程度低くても測定できることが求められる上に、面内分解能を高くすると1画素あたりの光は大きく減少する。これらの条件を考慮し、十分な感度をもち、高速で画像を取得できる専用 CCD チップを開発した。CCD 型受光素子は高感度であるが、全画素の電荷を順次転送しながら1画素ずつ読み出すために読み出し動作速度を高くすると急激にノイズが増える特性をもっているため読み出し動作速度には実用上の限界があり、1画面の読み出し時間はおおむね画素数に比例する。そこで画素数の多い CCD で性能を落とさずに読み出し時間を短縮するため、全体を分割して複数の読み出し

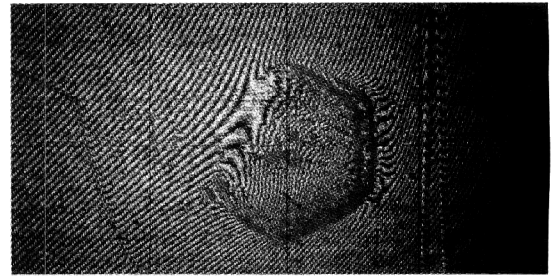


図5 本システムで撮影した干渉画像の例。マルチポート CCD の4ポートを使用(512×256画素)。(縦の黒線はポート境界)

ポートから並列に信号を取り出すマルチポート CCD の手法が必要となる。専用に開発した CCD チップは512×512画素を128×256画素の8領域に分割しており、動作速度10 Mpixel/sで1画面の読み出しを約3.5 msで終了する。光源がパルスレーザーであるためシャッター機能を省略し、画素の有効面積を大きくとれるフルフレームトランスファー方式を採用した。画素サイズは24×24 μmで400~1000 nmの波長範囲に感度をもち、量子効率も最大0.2である。

カメラヘッドには相関2重サンプリング機能をもつプリアンプを8系統と読み出し動作のクロック発生回路を組み込み、0~1 Vの明暗信号と同期クロックを出力する。出力におけるノイズは約2 mVp-pで、8ビット分解能でA/D変換を行うとノイズは分解能以下となって無視できる。外部からのトリガー信号に対する読み出し開始までの時間は約1 μsで読み出し時間に比べて無視できる程度に短いため、最小撮影間隔は読み出し時間に等しい3.5 msとなり、1024画面を約3.5秒で撮影できる。撮影した干渉画像の例を図5に示す。

2.4 周波数解析専用計算機

波長可変レーザーによって波長を走査しながら512×512画素の CCD で1024枚の画像を撮影することにより高さ分解能3 μmにおいて約1.5 mmの測定範囲が得られるが、図6に示すように約25万点の画素についてそれぞれ1024点の明暗値として記録された干渉縞の周波数を求める必要がある。各明暗値を8ビットで記録してもデータ総量は256 MBに達し、汎用の計算機では各画素のデータを再配列してFFT (fast Fourier transform) 演算を行い、得られたスペクトルからピークを検出する処理に数分間は必要となる。このため専用の並列計算機を開発して高速化を図った。1組のボード上に64 MBのフレームメモリーを備えてマルチポート CCD カメラの1ポートから出力されるデータを記録する。ボード上に4個の DSP (digital

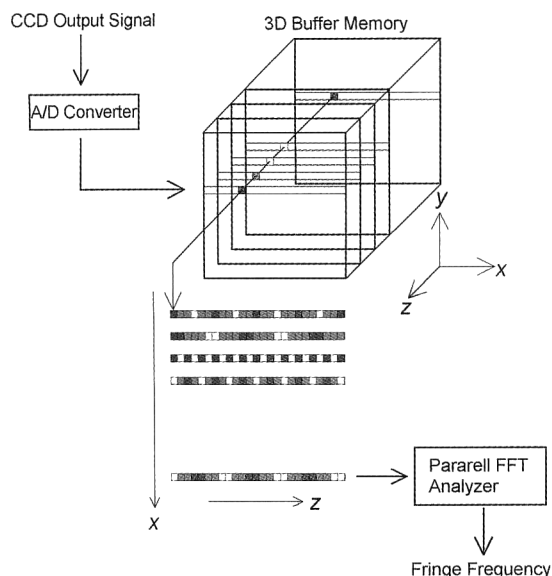


図6 干渉縞解析のデータ処理。各画素の明暗値を波長走査方向 (z 方向) に並べると干渉縞の周期がわかる。これに FFT 演算を施して周波数 F を検出する。

signal processor) を備え、それぞれが 8192 画素のデータを約 9.5 秒で処理する。各ボードは 2 組のフレームメモリーをもち、交互に切り替えることによって演算中に新しい 1 組のデータを記録することが可能である。これにより連

続して多数の視野を測定する場合には撮影と演算を並行処理できるため、1 視野について 9.5 秒で処理が終了する。

製作したボードはフレームバッファードと DSP ボードの 2 枚 1 組で、CompactPCI 規格のバスに接続される 6 U サイズ (奥行は規格外) である。フレームメモリーから特定画素の波長走査方向のデータ列を取り出して演算用の高速メモリーに転送する 3 次元アドレス制御回路を備えており内部のデータ転送を自動化している。DSP には HyperStone 社製 EI-32 を使用した。システムバスに過大な負担をかけないために FFT 演算に引き続いて内部でピーク検出を行い、検出した周波数と振幅の値のみを出力することによってホスト CPU へのデータ転送量を 8 系統のシステム全体で 1 MB に抑えている。測定条件に応じてピーク検出方式を調整することを想定し、DSP のプログラム中に複数のアルゴリズムを搭載して随時切り替えられる設計とした。

3. 実験結果

3.1 波数直線走査の効果

波数直線走査と波長直線走査を比較した結果を図 7 に示す。波長 740~842.3 nm の範囲で波長を等間隔に走査し

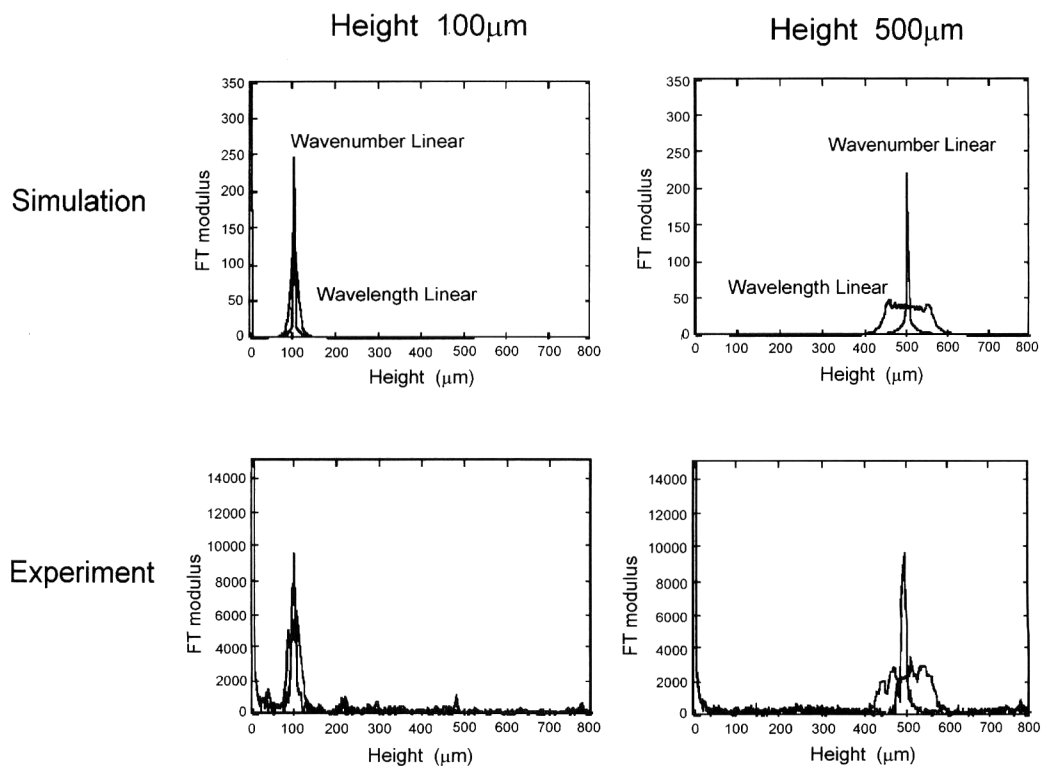


図7 波数直線走査と波長直線走査の比較。 $z=100\mu\text{m}$ と $z=500\mu\text{m}$ において波長走査範囲 740~842.3 nm で観測される干渉縞のパワースペクトルを示す。上段はシミュレーションによる予測で下段が実験結果である。各図の横軸は周波数を高さに換算してある。縦軸はフーリエ係数の絶対値である。波長直線走査では特に周波数の高い領域で顕著にピークが広がる。

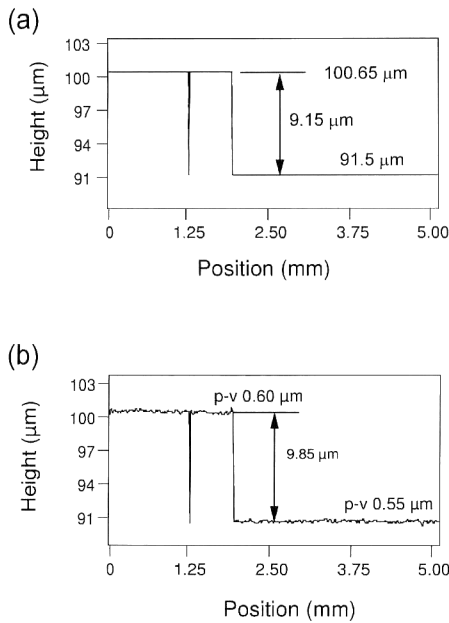


図8 ステップゲージの測定結果。(a) 最高点検出法、(b) 最高点と隣接2点を用いてピークの重心を検出 (1.28 mm のノイズはポート境界)。

た場合と波数を等間隔に走査した場合について、干渉縞の周波数が比較的低い領域と高い領域で比較を行った。シミュレーションによっても波長走査範囲を広くすると特に高周波数領域で波長直線走査ではピークが著しく広がってしまい、正確な計測が困難になることが予想される。実験結果もこの予想を裏付ける結果となった。従来の走査範囲の狭い波長走査干渉計ではあまり問題にはならなかったが、広帯域走査によって高さ分解能を向上させるためには波数直線走査が必要であることが明らかになった。

3.2 高さ分解能の評価

10 μmのステップゲージ (ミットヨ製, 段差 10.0 ± 0.02 μm) を計測した結果を図8に示す。FFT 演算によって得られたスペクトルから周波数のピークを検出する処理において単純に最高点検出法を用いた場合、周波数 F は整数値で表され δF となる。このときの高さ分解能 δh は 3.05 μm で、高さがこの値を単位として量子化されるため段差の値は 9.15 μm と表されている。平坦面ではノイズが分解能以下となっている。同じ測定データに対してピーク検出の際に最高点と両隣の点の値を用いてピークの重心を求めると段差の測定値は 9.85 μm となり真の値に近づいた。この結果において平坦面の部分に現れたノイズは p-v 値で約 0.6 μm となっている。図9はこのピーク検出アルゴリズムの試験として、平坦な面を傾斜させて測定した結果である。ピーク位置と整数値の刻みとの関係によって検出誤差に一定の傾向がある。計算値は波打っているが最大でも 1 μm 以下の誤差に収まっている。

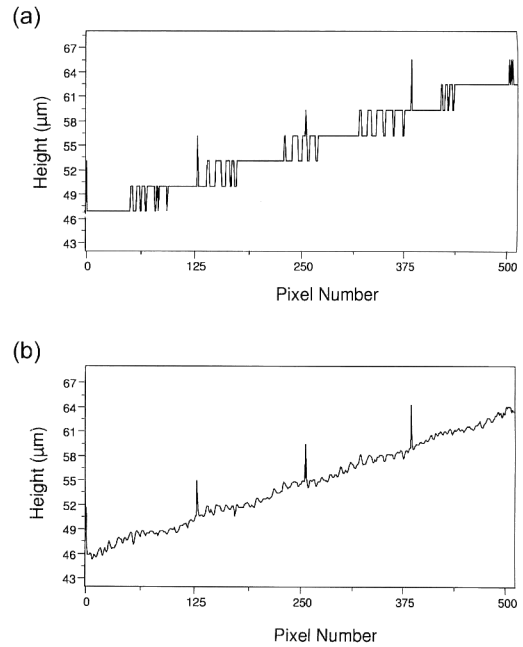


図9 ピーク検出アルゴリズムによる高さ分解能の改善。(a) 最高点検出法、(b) 最高点と隣接2点を用いてピークの重心を検出 (Pixel 0, 128, 256, 384 はポート境界)。

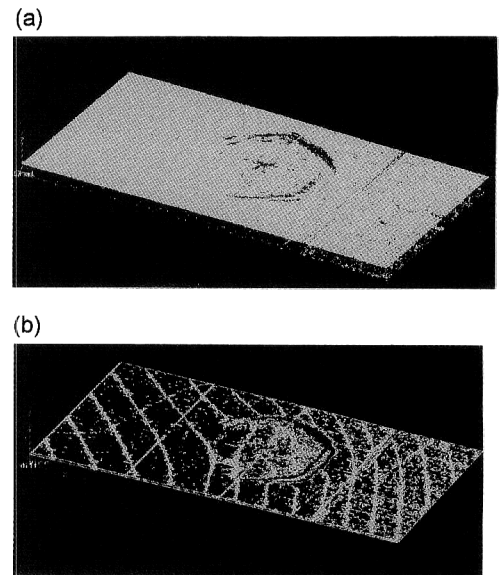


図10 段差試料の測定例。(a) 高さ分解能 3 μm ($\delta F = 1$)、面内分解能 10 μm での測定結果、(b) 過剰データを間引き処理した結果。

4. 形状計測結果の後処理

広帯域波長走査干渉計によって分解能と測定範囲を両立した形状計測が可能であることが明らかになった。しかし測定ノイズを皆無にすることは現状では難しい。特に反射率の低い対象や鋭いエッジの付近では十分な明るさが得られないために干渉縞の振幅が小さくなり、ピーク検出の精度が低下してノイズとなる画素が増える傾向がある。干渉

計の参照光強度を調整しても視野内に大きな明暗差があればノイズの発生は避けられない。レーザーの出力、CCDの感度およびダイナミックレンジの向上によって改善することは可能である。一方、後処理でノイズを取り除くことも汎用計測器として多様な対象を測定するために重要である。また、比較的単調な形状の対象についても大量の点群データを扱うことは、形状データを利用する立場からは過大な負担となる。したがって、適切な間引きによって情報量の欠損を起こさずにデータ量を削減する技術が求められる。このようなデータ処理についてはいまだ一般的な方式は確立していない。本研究の一環として開発中のソフトウェアによって処理を加えた結果を図10に示す。ここでは1画素のみ周囲から明らかに孤立している箇所をノイズとして処理し、比較的平坦な部分について過剰なデータを取り除くことによって情報量を損なうことなくデータ量を約6分の1にすることに成功している。

電子制御波長可変レーザーを光源として、従来にない広帯域の波長走査干渉計を開発し、高さ分解能 $1\mu\text{m}$ 以下、面内分解能 $10\mu\text{m}$ で25万点の点群データを9.5秒で取得することに成功した。高分解能と広い同時測定範囲を両立し、粗面や段差にも対応できる高速な形状計測システムとして実用化を目指している。

本研究の一部は科学技術庁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。特に光学系の製作には株式会社ミツトヨの協力を受けたことを感謝いたします。

文 献

- 1) I. Yamaguchi, A. Yamamoto and S. Kuwamura: "Speckle decorrelation in surface profilometry by wavelength scan-

ning interferometry," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 6721-6728.

- 2) A. Yamamoto and I. Yamaguchi: "Surface profilometry by wavelength scanning Fizeau interferometer," *Opt. Laser Technol.* (in press).
- 3) A. Yamamoto, I. Yamaguchi and M. Yano: "Surface shape measurement of tilted surfaces by wavelength scanning interferometry," *Proc. SPIE*, **3745** (1999) 32-39.
- 4) S. Kuwamura and I. Yamaguchi: "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement," *Appl. Opt.*, **36** (1996) 4473-4482.
- 5) M. Takeda and H. Yamamoto: "Fourier transform speckle profilometry: Three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces," *Appl. Opt.*, **36** (1994) 7829-7837.
- 6) T. H. Barnes, T. Eiju and K. Matsuda: "Rough surface profile measurement using speckle optical frequency domain reflectometry with an external cavity tunable diode laser," *Optik*, **103** (1996) 93-100.
- 7) H. J. Tiziani, B. Franze and P. Haible: "Wavelength-shift speckle interferometry for absolute profilometry using a mode-hop free external cavity diode laser," *J. Mod. Opt.*, **44** (1997) 1485-1496.
- 8) J. Kato and I. Yamaguchi: "Height gauging by wavelength-scanning interferometry with phase detection," *Proc. SPIE*, **3740** (1999) 594-597.
- 9) M. Kinoshita, M. Takeda, H. Yago, Y. Watanabe and T. Kurokawa: "Optical frequency-domain imaging microprofilometry with a frequency-tunable liquid-crystal Fabry-Perot etalon device," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 7063-7068.
- 10) S. Wada, A. Akagawa and H. Tashiro: "Electronically tuned Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 731-733.
- 11) J. Geng, S. Wada, Y. Urata and H. Tashiro: "Widely tunable, narrow-linewidth, subnanosecond pulse generation in an electronically tuned Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 676-679.
- 12) J. Geng, S. Wada, N. Saito and H. Tashiro: "Frequency structure in an electronically tuned Ti:sapphire laser: Periodic appearance of static fringes in both homodyne and heterodyne Michelson interferometers," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1635-1637.

(2000年7月28日受理)