

# 表面形状をナノメートル分解能で測定可能なナノリードの開発

Development of NANOLEAD for Surface Profile Measurement with Nanometer Resolution

松岡利幸 Toshiyuki Matsuoka, 菅井雅也 Masaya Sugai

**[要 旨]** ナノメートル分解能の非接触三次元形状測定センサ MK5320A ナノリードを開発した。白色干渉方式により、緩やかに形状が変化する物体だけでなく、ステップ状の段差を持つ物体も測定可能である。 piezoアクチュエータを使用して対物レンズを垂直方向に走査し、撮像素子で干渉縞を撮影することにより、被計測物の三次元形状を測定する。piezoアクチュエータの走査方法の改良と新しい信号処理アルゴリズムの位相クロス法の開発により、測定時間を従来の1/10に短縮し、撮像、演算ともに2秒以下を実現した。また、測定再現性( $\sigma$ )も従来の2倍向上させ、5nm(表面形状、測定条件に依存)を実現した。

**[Summary]** We have developed the MK5320A NANOLEAD, non-contact 3D surface profiler with nanometer resolution. The working principle is based on white-light interferometry, and it can measure objects with slowly varying shape as well as stepped height. To measure shape, the white-light interferometer scans the measured volume vertically by using a piezo-ceramic actuator and records observed interferograms. The MK5320A scans the measured volume in 2 seconds. This speed is 10 times faster than previous versions due to use of new data-processing algorithms and an improved volume scanning method. The high measurement repeatability of 5 nm, which varies with external conditions, is two times better than previously reported.

## 1 まえがき

最近の精密微細加工技術の進歩により、FPD (Flat Panel Display) やマイクロマシンなどの生産において、複雑な段差を持つ物体の微細表面形状を評価するために、ナノメートル分解能で表面形状を測定する要求が高まっている。特に FPD 市場においては、世界的な低価格競争の中で、安価で質の高い製品を安定に供給するために、単に精度良く表面形状を測定するだけでなく、不良品を生産しないためのインライン検査への要求も高まっている。こうした要求の中で、我々は白色干渉方式によるナノメートル分解能の非接触三次元形状測定センサ MK5320A ナノリード(図1)を開発した。MK5320A はステップ状の段差を持つ各種物体の微細表面形状を測定可能だが、今回特に FPD の中では最も多く生産されている LCD(Liquid Crystal Display) パネルの製造装置へ組み込み、インライン検査が可能であることを目指して開発を行った。

LCD パネルは、一対のガラス基板を対向させ、その間に液晶を封入し液晶層を形成する。液晶層の厚み(セルギャップ)は、ポストスペーサ(PS)と呼ばれるガラス基板上に形成された突起物で一定に保持されている(図2)。LCD パネルの高い表示品質を確保するためには、この PS のサブミクロン精度での高さコントロールが必要とされている。従来、PS の高さ検査には白色干渉方式が使用されてきたが、速度と精度の面においてインライン検査には十分でなかった。そこで、我々は新しい信号処理アルゴリズムである位相クロ



図1 MK5320A 外観図  
MK5320A External view

ス法の開発と干渉画像の取り込み方法の改良により、測定時間を従来の1/10に短縮し、撮像、演算ともに2秒以下、測定再現性も従来の2倍の5nm(表面形状、測定条件に依存)を実現し、LCD パネル製造装置へ組み込み、インライン検査で要求される高速、高精度を実現した。

## 2 原理

### 2.1 白色干渉計の原理

複雑な段差を持つ物体の微細表面形状を測定する方法として、以前より白色干渉計による測定方法が知られている<sup>1), 2)</sup>。白色干渉計は図3に示す光学系で構成される。

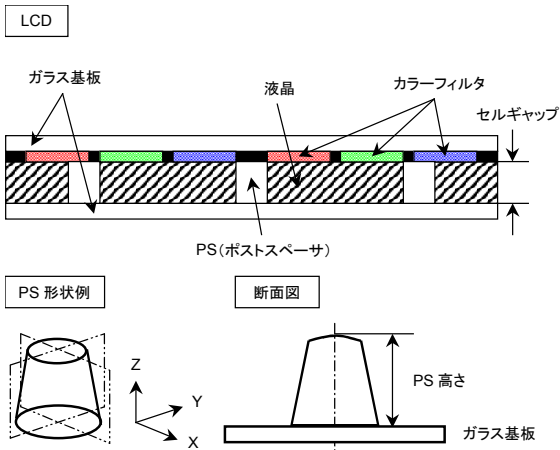


図2 LCDの構造  
LCD Structure

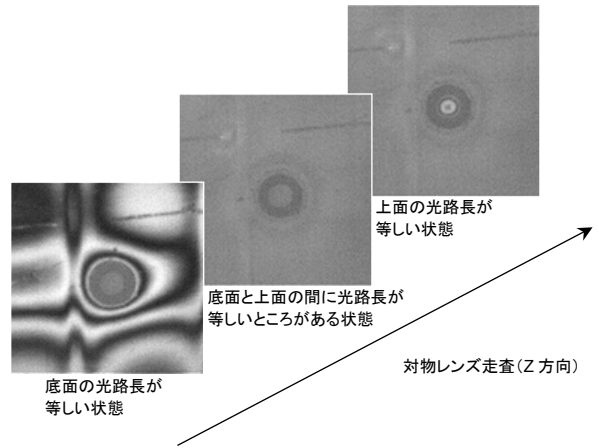


図4 干渉画像  
Interferogram images

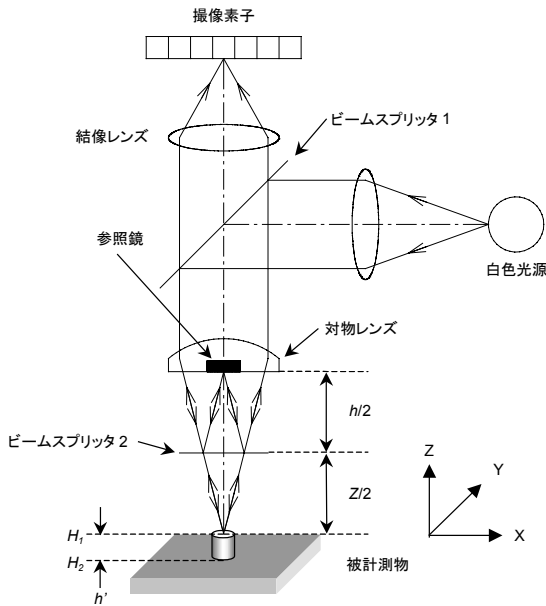


図3 白色干渉計の光学系  
White-light interferometry optical system

光源の白色光源を、ビームスプリッタ 1 で折り返し被計測物を上方から照明する。対物レンズに入射した光は、ビームスプリッタ 2 により 2 分され、一方は参照鏡で反射され(参照光)、他方は被計測物で反射され(物体光)、再びビームスプリッタ 2 により重ね合わされ干渉し、結像レンズにより撮像素子(CCDカメラやCMOSカメラ)上に干渉像が結像される。ここで、対物レンズを垂直方向( $z$ 方向)に走査しながら撮像を行うと、図4のような干渉画像が撮像される。

このとき、撮像素子の各画素の強度変化(干渉縞)は図5のようになる。この干渉縞は、複数の単色光の干渉縞を重畳したものであると考えることができ、参照光と物体光の光路長が等しい( $z = h$ )とき、各波長の干渉縞の位相が等しくなり、干渉縞のコントラストが最大となる。このような干渉縞は、白色干渉縞と呼ばれている。

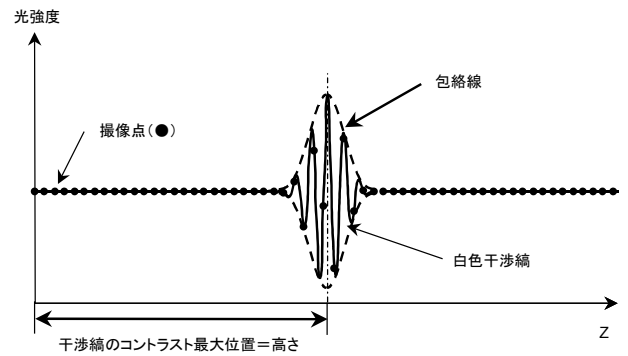


図5 白色干渉縞  
White-light interferogram

白色干渉縞のコントラストが最大となる位置(対物レンズの走査距離)から被計測物の表面の相対高さを得ることができる(図6)。

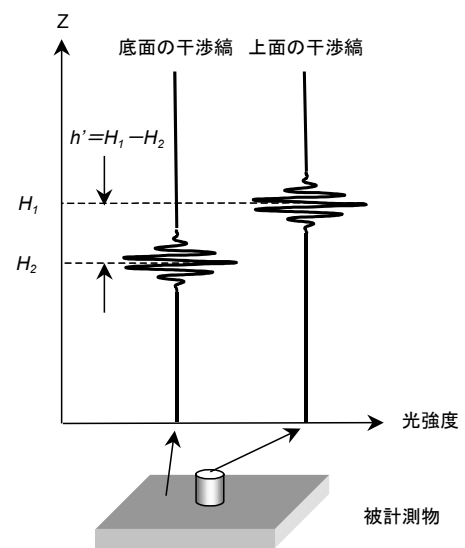


図6 白色干渉縞と表面の高さの関係  
Relationship of white-light interferogram and surface height

すべての画素について相対高さを求めることにより、三次元形状を求めることができる。

## 2.2 インライン検査における従来法の問題点

白色干渉計をインライン検査の限られた測定時間の中で使用するためには、撮像枚数を減らすことが有効である。一方、高い測定精度と分解能を得るためには、白色干渉縞のコントラストが最大となる位置を正確に求める必要がある。このために、これまでいくつかの方法が提案されている<sup>2), 3)</sup>。しかし、従来の方法のひとつである白色干渉縞の包絡線の最大位置を検出する方式<sup>2)</sup>においては、包絡線の頂点付近は変化がなだらかであるため、計測ノイズなどによって、大きな計測誤差が生じてしまうという問題や干渉縞のサンプリング間隔(撮像間隔)以下の高分解能化が困難であるという問題がある。もう一方の方法である干渉縞の周波数領域の位相勾配を用いて白色干渉縞のコントラストが最大となる位置を求める方式<sup>3)</sup>においては、粗いサンプリング間隔でも高分解能化を実現できるが、光源のスペクトル幅が狭い場合、利用できる位相情報の量が減るため、精度が低下するという問題がある。そこで、我々は新しい白色干渉縞の解析法として、分光帯域の異なる複数の干渉縞の位相情報を利用する位相クロス法を開発し、これらの問題を解決した<sup>4), 5)</sup>。

## 2.3 位相クロス法<sup>4), 5)</sup>

位相クロス法の流れを図7に示す。

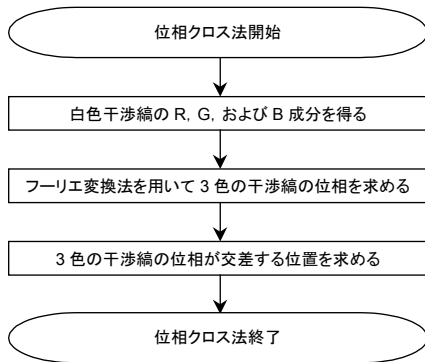


図7 位相クロス法の流れ

### Multi-spectral phase-crossing technique flowchart

撮像素子に、たとえば、R(赤色成分)、G(緑色成分)、B(青色成分)の3色分解機能を持つカメラを使用すると、入射された白色光について、白色干渉縞に含まれるR、GおよびBの成分ごとに独立して観測することができる。このようにして得られた白色干渉縞の各色成分をそれぞれ、 $I_n(z)$  ( $n = r, g, b$ ) とすると、式(1)のように表すことができる。

$$I_n(z) = a_n + |S_n(z-h)| \cos[k_n(z-h)] \quad (1)$$

式(1)において、 $a_n$ は白色干渉縞の直流成分であり、第2項は振幅を与える包絡線を表す $|S_n(z-h)|$ と各色成分の中心波数 $k_n$ で振動する正弦波との積になっている。 $z$ は光路長の変化量(ピエゾアクチュエータの走査距離)、 $h$ は被計測物の高さである。これら3色の干渉縞は、それぞれの分光帯域の中心波数に依存して、異なった波数で振動している(干渉縞の周期が異なっている)。

位相クロス法では、干渉縞の位相情報を利用するため、フーリエ変換法を用いて3色の干渉縞の位相を求める。このようにして求められた位相を図8に示す。

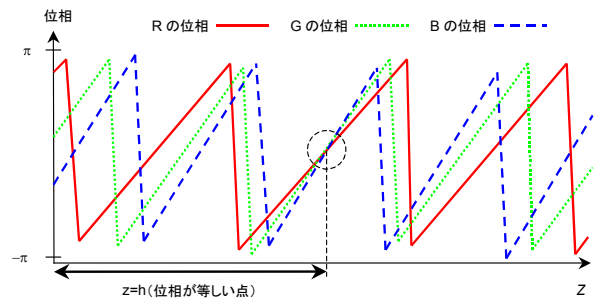


図8 位相クロス点

### Phase cross point

3色の干渉縞の位相は、光路長の変化量に対して、それぞれの分光帯域の中心波数 $k_n$ に依存し、波数が大きい(波長が短い)ほど急速に変化する性質を持っている。また、フーリエ変換法では位相を逆正接関数( $\tan^{-1}$ )で計算するため、それぞれ $-\pi \sim \pi$ の領域で折りたたまれた、傾きの異なる直線となっている。図8のように、3色の干渉縞の位相は $z \neq h$ の場合、それぞれ $k_n$ に依存した異なる値を持つが、 $z = h$ (光路差がゼロ)のときには3色の干渉縞の位相は互いに等しい値となる。このとき、3色の干渉縞のコントラストも、それぞれ最大となる。したがって、これらの干渉縞の重畳されたものである白色干渉縞のコントラストも最大となる。そこで、図8中に示した3色の干渉縞の位相を表す直線が交差する位置を求めることによって、白色干渉縞のコントラストが最大となる位置を求めることができる。3色の干渉縞の位相は、光路長の変化量に対して線形に増加するため、計測ノイズなどによる頂点付近における包絡線の微小変化がある場合や、サンプリング間隔を粗くした場合でも、ナイキスト定理を満足していれば、単純な線形補間を用いることによって高精度に位相を求めることができる。したがって、容易にサンプリング間隔以下の高分解能化を実現することが可能である。このようにして、白色干渉縞のコントラストが最大となる位置を求める方式を位相クロス法(Multi-spectral phase-crossing technique)と呼んでいる。

### 3 構成

MK5320A のハードウェア構成を図9に示す。

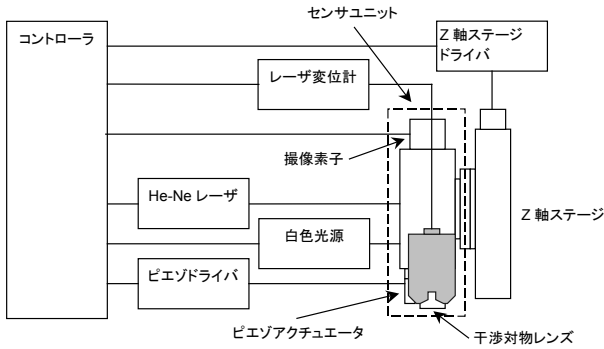


図9 MK5320A ハードウェア構成図  
MK5320A Block diagram

MK5320A は、白色干渉方式の光学系(図10)を構成するセンサユニット、センサユニットを搭載する Z 軸ステージ、高さ測定用の白色光源、光路長の変化量検出(後述)用の He-Ne レーザ、被計測物への位置決め用のレーザ変位計、これら各ハードウェアを制御するとともに演算処理を行うコントローラで構成される。

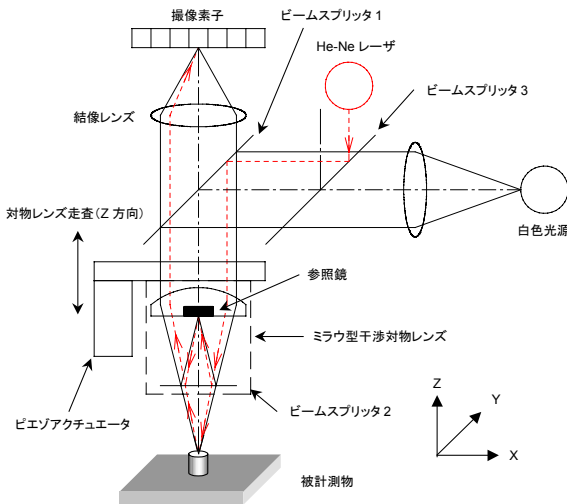


図10 MK5320A の光学系  
MK5320A Optical system

センサユニットの光学系は、ミラウ型干渉対物レンズを用いた無限系の干渉顕微鏡となっている。対物レンズの走査は、ピエゾアクチュエータを使用して移動する構造とした。白色光源からの光は、前述した白色干渉計による高さ測定に使用する。He-Ne レーザは、ビームスプリッタ3により白色光源と重ね合わされ、被計測物に白色光源と同時に照射する構成とした。このように、光路が重なって

る場合でも、He-Ne レーザと白色光は位相が異なっており、互いに干渉することはないため、それぞれの測定に影響を与えることはない。撮像素子は、白色干渉縞を R, G, および B の成分ごとに独立して記録できる単板式のカラーカメラを使用している。コントローラは、大容量のカメラ画像を高速に演算処理するため、CPU は Intel<sup>®</sup> Xeon<sup>®</sup> 3.4GHz×2、主メモリ 2GB を搭載したものを使用している。ソフトウェアは、Microsoft<sup>®</sup> Windows<sup>®</sup> XP Professional を OS としたコントローラ上で動作する。

### 4 設計の要点

#### 4.1 高精度、高分解能化

白色干渉計は被計測物の相対高さを測定するものであるため、絶対高さの測定には高さのスケールが必要である。高さのスケールの一般的な方法は、ピエゾアクチュエータの変位量を静電容量センサなどの位置検出センサを用いて求める方法である。この方法は、簡単ではあるが、分解能は数ナノメートル(ピエゾアクチュエータの最大変位量に依存)である。そして、静電容量センサの特性がそのまま測定精度に影響する可能性があり、周囲環境、経年変化などによる測定精度劣化が起こりやすいという問題がある。そこで、静電容量センサを定期的に校正する必要がある。しかし、我々は He-Ne レーザ干渉計(光学系は前述の白色干渉計と共通)を搭載し、光路長の変化量(ピエゾアクチュエータの変位量)を求める機能を設けた<sup>6)</sup>。He-Ne レーザの干渉縞の強度変化は、周期が波長の 1/2 の正弦波の繰り返しになっており、位相変化からピエゾの基準位置(初期位置)からの相対的な変位量を測定できる。したがって、He-Ne レーザの干渉縞を He-Ne レーザの波長で刻まれたスケールとして使用することにより、ピエゾアクチュエータの変位量を 1nm 以下の高い分解能で測定することができ、波長安定性が高いため、定期的な校正を必要としない。この方法と前述の位相クロス法を組み合わせることにより、従来比 2 倍の測定再現性( $\sigma$ ) 5nm を実現した。

#### 4.2 測定時間の短縮

PS の径は $\phi 10 \sim 20 \mu\text{m}$  程度であるが、表面形状を測定するために十分な数のデータをサンプリングできるように、水平分解能は  $0.52 \mu\text{m}$  とし、標準の測定視野は  $66.6 \times 66.6 \mu\text{m}$  とした。また、PS の高さは  $5 \mu\text{m}$  程度であるため、ピエゾアクチュエータの走査距離(高さ測定範囲)は  $25 \mu\text{m}$  とした。この条件において、測定時間を従来の 1/10 に短縮し、撮影、演算ともに 2 秒以下を実現した。

##### (1) 撮像時間の短縮

従来の方式は、白色干渉縞のコントラストが最大となる位

置を精度良く求めるために、干渉縞のサンプリング間隔を十分細かくする(撮像素子数を増やす)必要があり、測定時間が長くなるという問題がある。しかも、撮影のつど対物レンズを停止させてから、ピエゾアクチュエータの整定時間(30 ミリ秒)を待って撮像していたため、多数枚の撮影には多くの時間が必要であった(我々の実験では 50 秒かかった)。

前者の問題に対しては、位相クロス法を適用することで、精度と分解能を低下させることなく、撮像素子数を 1/2 以下に減らすことを実現した。後者の問題に対しては、白色干渉計による高さ測定と同時に、He-Ne レーザ干渉計によりピエゾアクチュエータの変位量を求める構成としたことで、ピエゾアクチュエータの整定時間を待つ必要がなくなり、連続的に対物レンズを走査しても、精度と分解能を低下させることなく、撮像時間を短縮することを実現した<sup>7)</sup>。

## (2) 信号処理時間の短縮

位相クロス法は、フーリエ変換法を用いて干渉縞の位相を求めている。そのため、信号処理時間の中で最も支配的なのは、フーリエ変換法を用いて干渉縞の位相を求めるのに要する時間である。

MK5320A の信号処理では、最初に撮像素子で撮影した3色の干渉縞の中から任意の1色の干渉縞だけに着目し、干渉縞の強度情報から振幅の変化の大きい位置を求めることにより、白色干渉縞のコントラストが最大となる位置を粗く推定する(図11(a))。そして、粗く推定された位置を含む所定の範囲内において(図11(b))、位相クロス法により、

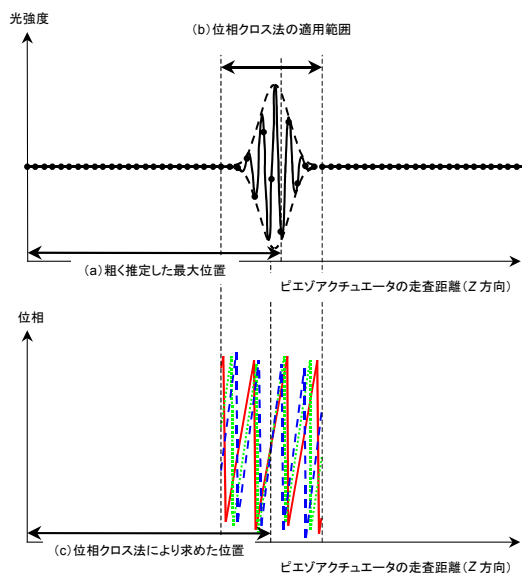


図11 信号処理時間の短縮  
Reduction of data processing time

白色干渉縞のコントラストが最大となる位置をより精密に決定する(図11(c))。このような2段階の方法をとることにより、フーリエ変換を適用するデータ点数を減らすことができるため、白色干渉縞のコントラストが最大となる位置を高速に求めることが可能となった。

## 4.3 小型、軽量化

センサユニットを構成する切削部品に関してはアルミ材を使用し、質量 2.5kg 以下を実現した。また、He-Ne レーザの光量調整に必要な部品を光源側に設けることで、センサ内部の部品点数を少なくした。さらに、LCD 製造装置へセンサユニットを取り付けた際の角度(傾き)調整機構を厚さ 8mm 以内に集約することにより、極力小型化することに努めた。(サイズ: 84mm (W) × 228mm (H) × 123mm (D))。

## 4.4 オートフォーカス機能

MK5320A は、三角測量方式のレーザ変位計をセンサユニットに搭載したことにより、白色干渉計を測定位置(対物レンズの作動距離位置)へ自動で移動する機能(オートフォーカス機能)を備えた(図12)。これにより、被計測物への位置合わせを簡単、かつ高速に行うことを可能とした(Z 軸原点復帰直後のオートフォーカス時間: 3 秒以下、オートフォーカス精度: ±1μm)。オートフォーカスの流れを図13に示す。

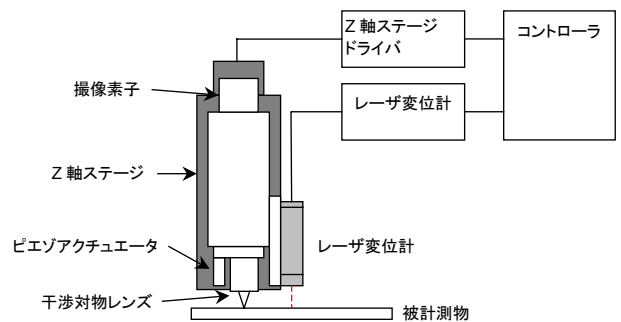


図12 オートフォーカス機構  
Autofocus system

## 4.5 PS 高さ計算機能

MK5320A は、測定時に設定する3か所の基準面の高さを基に、生成した三次元形状の傾きを補正して、PS 高さを計算する機能を備えた(図14)。これにより、被計測物が傾いていた場合でも、傾きを調整することなく、正確な高さ測定が可能となった。PS 高さは、以下の計算式で求める。B1, B2, B3 は、任意の位置に設定することが可能である。

$$\text{平均高さ: } A_{ave} = (B1 + B2 + B3) / 3 \quad (2)$$

$$\text{最大高さ: } A_{max} = (B1 + B2 + B3) / 3 \quad (3)$$

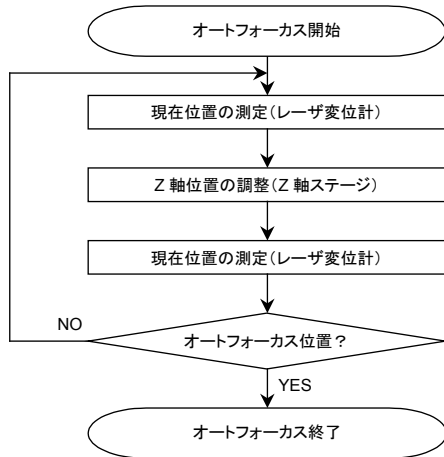


図 13 オートフォーカスの流れ  
Autofocus flowchart

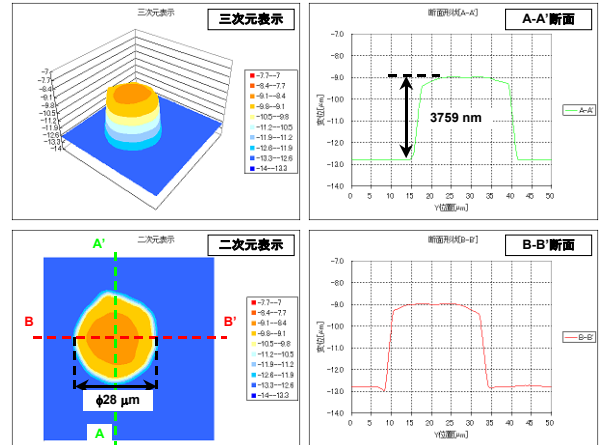


図 15 PS 測定結果  
Post spacer measurement result

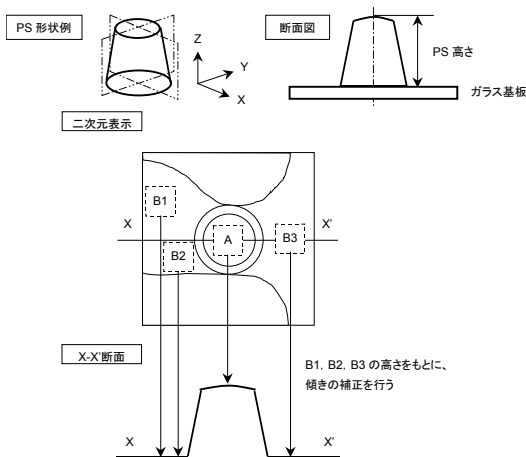


図 14 高さの計算方法  
Height calculation

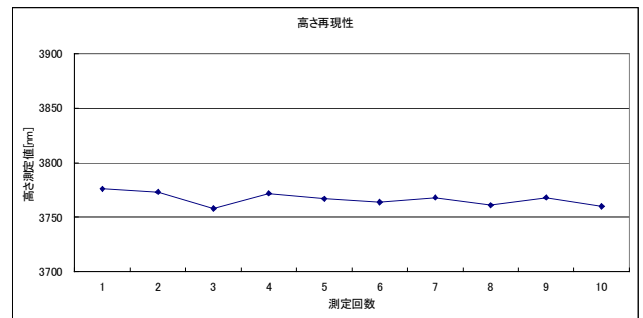


図 16 高さ再現性  
Height measurement repeatability

## 5 機能, 性能

### 5.1 PS 測定結果

MK5320A を用いた測定例として, ガラス基板上に形成された PS の測定結果を図 15 に示す。測定時間は, 測定範囲: 25 $\mu$ m, 測定視野: 66.6 $\times$ 66.6 $\mu$ m (128 $\times$ 128 画素), 撮像枚数: 512 枚の条件のとき, 撮像時間=1.9 秒, 演算時間=1.1 秒であった。

### 5.2 高さ再現性

5.1 節で測定した PS を繰り返し測定した結果を図 16 に示す。測定結果は,  $\sigma=5.9$ nm (0.16%) が得られた。

なお, 段差ゲージ (VLSI スタンダード社製, 180nm) を測定した場合,  $\sigma=0.6$ nm (0.3%) が得られている。

### 5.3 主な仕様

MK5320A の主な仕様を表 1 に示す。

表 1 主な仕様  
Specifications

項目	仕様
最大高さ測定範囲	70 $\mu$ m
高さ分解能	1nm
高さ再現性 ( $\sigma$ ) *1	5nm
水平分解能	X: 0.52 $\mu$ m, Y: 0.52 $\mu$ m
最大測定視野	0.27 $\times$ 0.27mm
撮影時間 *2	2 秒/視野
演算時間 *2	2 秒/視野
最大画素分解能	512 $\times$ 512 画素
作動距離	4.7mm
光源	ハロゲンランプ
使用温度範囲	10 $\sim$ 35 $^{\circ}$ C
保存温度範囲	-10 $\sim$ 50 $^{\circ}$ C

\*1: 段差ゲージ測定時

\*2: 高さ測定範囲: 25 $\mu$ m

測定視野: 66.6 $\times$ 66.6 $\mu$ m (128 $\times$ 128 画素)

撮像枚数: 512 枚

## 6 むすび

白色干渉計において、分光帯域の異なる複数の干渉縞の位相情報を利用する新しい信号処理アルゴリズム位相クロス法を開発し、ナノメートル分解能の非接触三次元形状測定センサ MK5320A ナノリードを開発した。測定時間は撮像、演算ともに 2 秒以下、測定再現性( $\sigma$ )は 5nm を実現した。今回は FPD 市場における LCD パネル製造への応用例として、PS 高さ測定について紹介した。今後は、多様な使用環境に対応するセンサ単体での除振対策、多様な市場要求に応える PS 高さ測定以外のデータ分析機能の強化、および研究、開発などオフラインでの解析用ソフトウェアを開発する予定である。

## 謝辞

本開発は国立大学法人電気通信大学殿との共同研究の成果です。MK5320A の開発に当たっては、同大学情報通信工学科 武田光夫教授、Michał Pawłowski 博士、および武田研究室の皆様から多大な協力をいただきました。ここに深謝いたします。

## 参考文献

- 1) N. Balasubramanian, "Optical system for surface topography measurement," USP 4,340,306 (1982)
- 2) 西一樹, 羽石秀昭:「計算機処理による白色干渉膜厚測定法」, 1983-1984 年度電気通信大学卒業研究論文; "Mirau correlation microscope," Appl. Opt. 29, 3775-3783 (1990).
- 3) P. de Groot, and L. Deck, "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms," Opt. Lett. 18, 1462-1464 (1993).
- 4) M. E. Pawłowski, Y. Sakano, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Multi-spectral phase-crossing white-light interferometry," Proc. of SPIE, Vol. 5776, 88-93 (2005)
- 5) 武田光夫, M. E. Pawłowski, 坂野洋平:「三次元形状計測装置」, 特願 2004-371632, 2004 年 12 月
- 6) 松岡利幸, 辻村映治, 菅井雅也:「三次元形状測定装置(He-Ne を使ったスケール)」, 特願 2006-6729, 2006 年 1 月
- 7) 辻村映治, 松岡利幸, 菅井雅也:「三次元形状測定装置」, 特願 2006-7440, 2006 年 1 月

---

## 執筆者



松岡利幸  
精密計測事業推進部  
開発部プロジェクトチーム



菅井雅也  
精密計測事業推進部  
開発部プロジェクトチーム