

新しい信号処理アルゴリズムを用いた 高速非接触3次元形状測定装置

北川 克一

1. はじめに

サブミクロンから数十ミクロンの3次元表面凹凸を精度良く測定することは、半導体、液晶の分野に限らず、多くの産業分野において、ますますニーズが高まっている。これまで多数の手法が提案されているが、非接触測定であり、測定速度が高速で、測定精度も高い光干渉法が最もFA用途に適していると考えられる。

光干渉を利用した表面凹凸計測は、測定面からの反射光と参照面からの反射光を干渉させた時に、波長の $1/2$ の光路差ごとに明暗の縞が観測されることを利用している。近年、デジタル画像処理の進歩に伴い、干渉縞解析を自動化し、高速・高精度に表面形状を自動計測することが可能になった。その代表的な手法の一つが垂直走査法(VSI法: Vertical Scanning Interferometry)である。

東レエンジニアリング(株)は、東工大大学院情報理工学研究科 小川研究室と共同で、垂直走査法の走査速度を従来の10倍以上に高速化できる新しい信号処理アルゴリズム(SBアルゴリズム)を考案し、それを内蔵した世界最高速の非接触表面形状測定装置SP-500を開発したので紹介する。

2. 測定原理

本測定装置で使用する干渉顕微鏡(ミラウ型)を図1に示す。

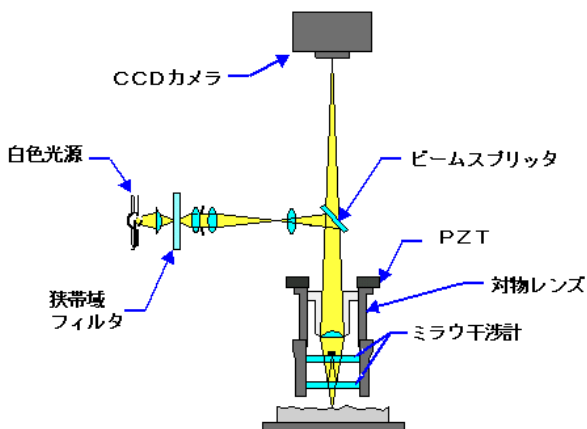


図1 干渉顕微鏡の光学系(Mirau型)

光源に白色光を用いて、対物レンズをZ軸方向に走査すると、図2のように、試料面と参照面との光路差がゼロとなる箇所でコントラスト最大の干渉画像が撮像される。これらの画像の各点の輝度に注目すると、図3に示すような干渉波形(インターフェログラム)が得られる。このピーク位置が試料表面の高さに対応

しているため、画面内の各画素における高さ、すなわち表面の3次元形状を一括して求めることができる。

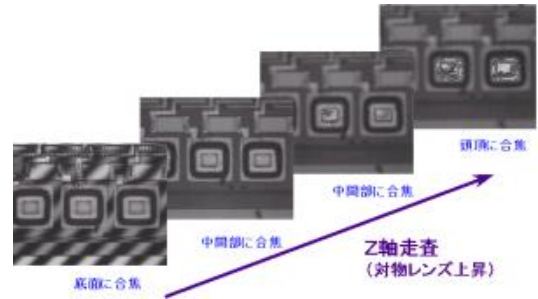


図2 Z軸走査時の干渉画像

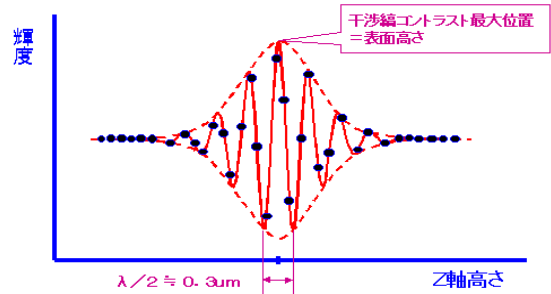


図3 インターフェログラム

ところで、実際の測定で得られるデータは、図3のような連続的なものではなく、同図に●で示すような離散的なものである。この離散的なデータから干渉波形の最大位置を求める方法として、いくつかの提案がある。たとえば、干渉波形のAC成分を自乗し、ローパスフィルタを通して、包絡波形の最大位置を求めている。このような方法では、標本点間隔を十分小さく取る必要があり、測定速度が遅いという問題点があった。

3. 新しいアルゴリズム-SB法⁽¹⁾⁻⁽³⁾

筆者らは、ナイキスト定理を満たす標本点間隔(以下、ナイキスト間隔と呼ぶ)よりも遥かに広い間隔でサンプリングした観測値から干渉波形のピーク位置を求める新しいアルゴリズム(SBアルゴリズムと名付けた)を開発した。このアルゴリズムには、白色光の波長が狭い範囲に制限されている必要があるが、これは顕微鏡の照明部にバンドパス・フィルタを挿入することで達成できる。以下に、SBアルゴリズムの概要を述べる。

干渉波形 $f(h)$ の周波数が $\omega_c \pm \omega_a$ に帯域制限されている場合、帯域通過型標本化定理を適用でき、 $f(h)$ はその標本値 $f(h_m)$ ($m=-\infty \sim +\infty$) を用いて

$$f(h) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(h_m) \phi_m(h) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $f(h_m)$ は、 I を正の整数とし、 ω_c', ω_a' を $\omega_c' - \omega_a' \leq \omega_c - \omega_a$; $\omega_c' + \omega_a' \leq \omega_c + \omega_a$; $\omega_c' = (2I + 1)\omega_a'$ を満たす正の実数とすると、標本点間隔 $\Delta B = \pi / (2\omega_a')$ を用いて、 $h_m = (m-1)\Delta B$ で与えられる標本点データである。

また、

$$\phi_m(h) = \text{sinc} [\omega_a'(h - h_m) / \pi] \cdot \cos [\omega_c'(h - h_m)] \quad (2)$$

である。

ところで、実際の系では標本値が有限個であるから、式(1)の無限級数を第 M 項まで打ち切り、 y_m を観測値 z_m から直流成分を除去したAC成分として、 $y_m = z_m - z_{\text{average}}$ で定義すると、干渉波形の復元関数 $f_B(h)$ は

$$f_B(h) = \sum_{m=1}^M y_m \phi_m(h) \quad (3)$$

で表される。

このようにして復元された波形から、干渉波形の包絡線を2乗した関数 $r(h)$ (以下、2乗包絡線関数と呼ぶ) を推定することができる。

ところで、最終的に求めたいものは $r(h)$ のピーク位置であり、干渉波形そのものは不要である。我々は、干渉波形の標本値から直接 $r(h)$ の推定値 $r_B(h_j)$ を求める式を導出した。例えば、 h が標本点、すなわち $h = h_j$ (J は $1 \leq J \leq M$ の整数) の場合には

$$r_B(h_j) = (y_j)^2 + (4/\pi^2) \{ \sum (y_m / (J-m)) \}^2 \quad (4)$$

ここで Σ は m に関して、 J が偶数であればすべての奇数番目の標本点に関する和を示し、 J が奇数であればすべての偶数番目の標本点に関する和を示す。のように代数演算だけの簡単な式になる。

2乗包絡線関数 $r(h)$ が最大となる h は、式(4)により標本点における $r_B(h)$ を求め、その最大値付近でピークを内挿探索することにより求められる。

図4にSBアルゴリズムの概念を示す。

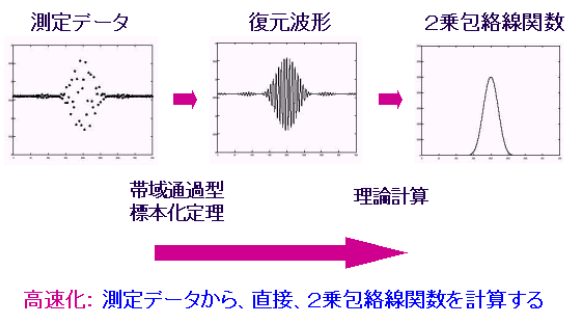


図4 SBアルゴリズムの概念

4. 装置構成

開発した装置の外観を図5に、構成を図6に示す。



図5 SP-500外観

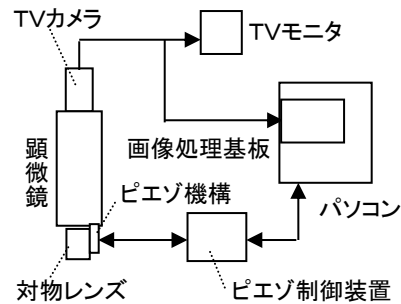


図6 装置構成

干渉光学系は顕微鏡にミラウ干渉対物レンズを組み合わせた。Z軸走査系はピエゾ機構により対物レンズを移動させる構造とした。照明光源としてハロゲンランプを用い、狭帯域フィルタとして、中心波長 600nm、半値幅約 40nm の干渉フィルタを用いた。

テレビカメラからの画像信号は、デジタル変換され、1画面を 512×480 画素×8ビットのデータとしてメモリに取り込まれる。画像処理演算は、Pentium III (600MHz)により行われる。

5. 特長

SP-500の特長は以下の通りである。

- ① 高精度: nmオーダーの高さ測定分解能
- ② 高速走査: Z軸走査速度 50 $\mu\text{m}/\text{秒}$ が可能 (世界最高速)
- ③ 2次元カメラによる画面内一括高速測定: 測定時間は数秒/画面
- ④ 広い測定レンジ: 高さ測定レンジは最大 350 μm
- ⑤ 視野サイズ可変: 対物レンズ交換により最大視野 数mm×数mm

6. 実サンプル測定結果

形状測定装置SP-500を用いて、実サンプルを測定した例を示す。

6.1 標準段差

測定速度 25.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ (標本点間隔 0.85 μm) で標準段差 (9.947 μm) を測定した結果を図7に示す。標本点間隔はナイキスト間隔の約6倍であるが、ほぼ正確な表面形状が測定されている。段差の平均値は 10.031 μm であった。

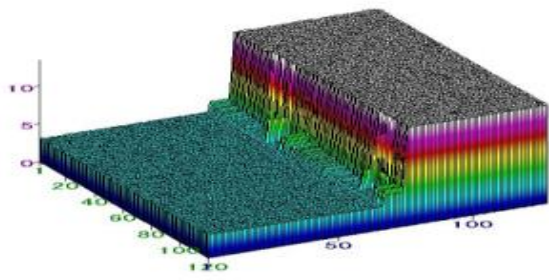


図7 測定例:標準段差

この時のある点における輝度データ、復元波形、2乗包絡線関数を図8に示す。後者2つの波形は、性能確認と表示のために十分細かい間隔で計算しなおしたものである。

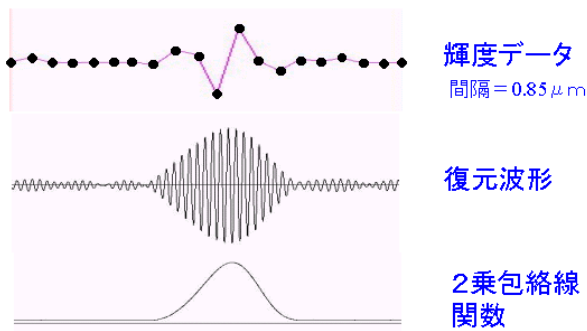


図8 波形復元と2乗包絡線関数

6.2 コイン表面

ナイキスト間隔の約1.2倍の標本点間隔に相当する速度 $51 \mu\text{m}/\text{sec}$ で、図9のコイン表面形状を測定した例を図10に示す。測定レンジを $55 \mu\text{m}$ として、1画面内の表面形状が2秒以内で測定できる。図11は測定結果の3次元表示である。



図9 測定対象のコイン

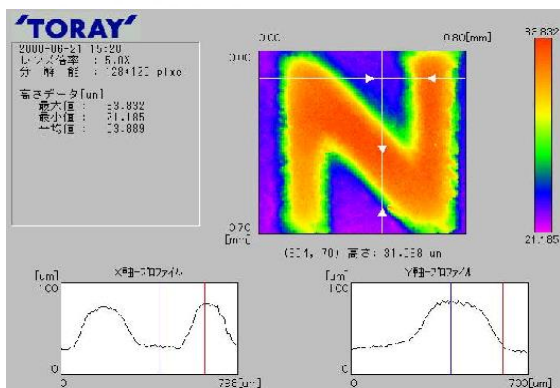


図10 測定結果(走査速度: $51 \mu\text{m}/\text{sec}$)

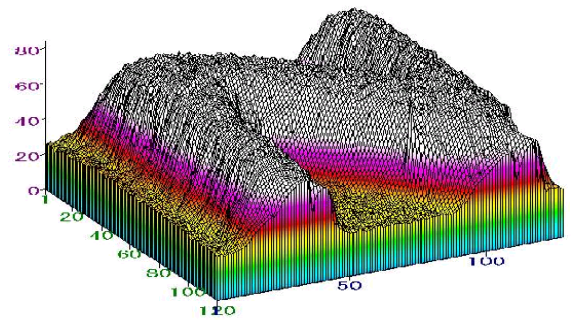


図11 測定結果の3D表示

7. おわりに

垂直走査型白色干渉法において帯域通過型標本化定理を応用した新しい信号処理アルゴリズムを考案し、筆者らの知る限り世界最高速の光干渉式表面形状測定装置 SP-500 を開発した。カメラ1視野 (15,000~250,000点) の高さを数秒で測定できる。また、同一装置で位相シフト法による測定も可能である。

半導体、ディスプレイ、電子機器、光学素子、精密機械部品などの3次元形状測定・検査に広い応用が期待される。

参考文献

- (1) 平林晃, 小川英光, 水谷竜也, 永井健, 北川克一: 帯域通過型標本化定理を用いた白色干渉による表面凹凸形状の高速測定, 計測自動制御学会論文集, 36(1), 16/25 (2000)
- (2) 北川克一, 平林晃, 小川英光, 水谷竜也: 狭帯域白色光干渉による高速表面形状測定装置の開発—帯域通過型標本化定理の応用—, 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 103 D-4 (2000)
- (3) 特許出願中

トピックス

表面形状測定装置“SP-500”が産学共同の成果の例としてNHK-TV番組「クローズアップ現代—大学からベンチャーは生まれるか?」で東工大TLOの活動と共に紹介されました。(2000年7月25日放送)



本資料は、下記掲載記事の原稿に基づいている。「高速表面形状測定装置」、東工大テクノロジー、Vol.4 (2001)