

北海道大学工学部 ○高谷裕浩、三好隆志、斎藤勝政

## 1. はじめに

計算機用記憶媒体として用いられる光ディスクのトラッキング用グループなどに見られるサブミクロンオーダの表面微細形状加工は、エッチング処理などの制御の難しい加工工程が中心となっており、所望の表面形状を作成するためには、加工進行状況のモニタリングが必要となってきている。

本研究は、そのような表面微細形状を非接触で定量的に評価できる光学的手法の開発を目的としており、そのためには表面微細形状における光学的挙動を解析し、その結果に基づいた測定アルゴリズムの確立が必要となる。

そこで本報では、反射光情報から微細形状そのものを復元する方法として、位相復元法を用いた光学的逆フーリエ変換のアルゴリズムを導出し、さらにそのアルゴリズムについて、サブミクロンオーダの表面微細溝(グループ)形状を測定対象とした計算機シミュレーションによって検討したので報告する。

## 2. 光学的逆フーリエ変換による表面微細形状の復元

図1において微細な形状を持つ表面(x-y面)に波長 $\lambda$ 、スポット径 $w$ のレーザー光を垂直(入射角=0)に照射したとき、表面における複素振幅分布 $E(x)$ は、微細形状の凹凸を表わす関数を $h(x)$ として、

$$E(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{w^2}\right) \exp\left\{i \frac{4\pi}{\lambda} h(x)\right\} \quad (1)$$

と表わされる。但し、今簡単のために一次元の場合を考えるものとする。このとき、像面( $\xi-\eta$ 面)における複素振幅分布 $u(k_x)$ は、空間周波数 $k_x = \xi / \lambda f$ とする、

$$u(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) \exp(-2\pi i k_x x) dx \\ = |u(k_x)| \exp[i\phi(k_x)] \quad (2)$$

のように表わされる。但し、 $f$ はレンズの焦点距離、 $w = 2L$ とする。

今、(2)式において像面における複素振幅は表面の複素振幅のフーリエ変換したものになっていることから、像面における複素振幅分布が分かれば、(2)式の逆フーリエ変換によって、

$$F^{-1}\{u(k_x)\} = E(x) \quad F^{-1}: \text{逆フーリエ変換} \quad (3)$$

を求め、

$$\arg\{E(x)\} = \frac{4\pi}{\lambda} h(x) \quad (4)$$

より、表面の微細形状 $h(x)$ を復元することができる。以上(3)、(4)式のプロセスを光学的逆フーリエ変換と呼ぶことにする。

さて、光学的逆フーリエ変換のプロセスに必要な観測値は(2)式より振幅 $|u(k_x)|$ と位相 $\phi(k_x)$ である。ところが、我々が観測できるのは光強度分布 $I(k_x) = |u(k_x)|^2$ だけであり、位相 $\phi(k_x)$ は可観測値とはなっていない。従って、何らかの方法で位相を求める必要がある。そこで今、位相復元問題(Phase retrieval problem)の解における、 $\phi(k_x)$ を求めるアルゴリズムを導入すれば、光学的逆フーリエ変換が可能となり、反射光強度分布から表面微細形状を復元することができる。

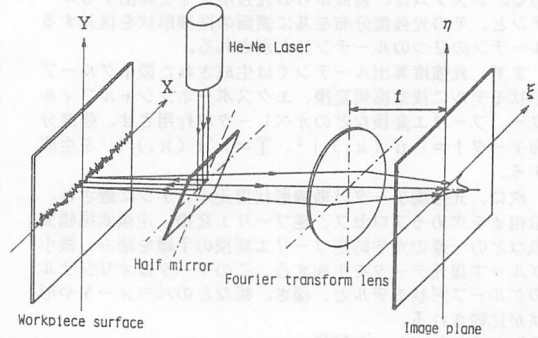


図1 フーリエ変換光学系

3. 位相 $\phi(k_x)$ を求めるアルゴリズム

位相復元問題は様々な光学的逆問題<sup>1)</sup>の一つであり、解を求めるアプローチもいくつか提案されている。そのなかでもエクスポネンシャルタイプの汎関数(Entire Function)の数学的特性を利用する手法は数学的に厳密な解が導出されるという点で、本研究における光学的フーリエ変換の理論への導入に適しているという利点を持っている。

以上のような理由から、本研究ではログリズム-ヒルベルト変換(Logarithmic Hilbert Transformation)とフーリエ級数展開を利用した位相復元法<sup>2)</sup>の導入を行なった。このアルゴリズムは、二つの光強度の情報を用いる手法で、もう一つの光強度情報として、表面における複素振幅 $E(x)$ を振幅透過率が $\exp(-2\pi y_0 x)$ ( $y_0$ は任意の定数)で表わされるエクスポネンシャルフィルターを通過させ光学的フーリエ変換を行なった強度分布 $\hat{u}$ を利用するものである。

図2は、二つの強度情報 $u$ および $\hat{u}$ から位相 $\phi$ を求めるアルゴリズムを数式的展開として示したものである。以下に各ステップについて説明する。

ステップ1: 二つの光強度分布 $I$ 、 $\hat{I}$ の測定を行って振幅 $|u(k_x)|$ 、 $|\hat{u}(k_x)|$ を求める、

ステップ2:  $|u(k_x)|$ よりヒルベルト位相 $\phi_H$ を求める(但し、 $p$ はコーシーの主値を表わす)

ステップ3: ヒルベルト位相 $\phi_H$ を用いてヒルベルト関数 $u_H(k_x)$ を求める、

ステップ4: ヒルベルト関数 $u_H(k_x)$ を逆フーリエ変換しエクスポネンシャルフィルターをかけ、それをフーリエ変換して振幅 $|\hat{u}_H(k_x)|$ を求める、

ステップ5:  $|\hat{u}(k_x)|$ と $|\hat{u}_H(k_x)|$ を用いてフーリエ級数の係数 $a_n$ 、 $b_n$ を求める、(ここで $I$ はフーリエ変換面における観測域を表わす)

ステップ6: 係数 $a_n$ 、 $b_n$ を $\phi_z$ のフーリエ級数展開の係数として $\phi_z$ を求める、

ステップ7: 位相 $\phi$ は $\phi_H$ と $\phi_z$ の和として求められる。

以上のようにして求めた位相 $\phi$ は光学的逆フーリエ変換のプロセスに代入され、微細形状の関数 $h(x)$ が復元される。また、 $4\pi/\lambda * h(x) < 2\pi$ より $\lambda$ をHe-Neレーザの波長(0.633 $\mu$ m)とすると、本手法の測定限界は高さ方向で $h(x) < 316$ nmである。

#### 4. 計算機シミュレーション

上述した光学的逆フーリエ変換の理論に基づく表面微細形状の復元法のアルゴリズムを計算機上に実現させ、表面微細形状として微小グループモデルを与え、シミュレーション実験を行なった。

##### 1) シミュレーションの方法

図3はシミュレーションシステムの概要を示したものである。システムは、表面からの光強度分布を算出するルーチンと、その光強度分布を基に表面の微細形状を復元するルーチンの2つのルーチンに大別される。

まず、光強度算出ルーチンでは生成された微小グループ形状モデルに複素振幅変換、エクスポネンシャルフィルター、フーリエ変換などのオペレータを作用させ、強度分布データ  $I = |u(k_x)|^2$ 、 $\hat{I} = |\hat{u}(k_x)|^2$  を生成する。

次に、光強度データは微細形状復元ルーチンに渡され、位相  $\phi$  を求めるプロセス、逆フーリエ変換、逆複素振幅変換などの一連の光学的逆フーリエ変換の手順を踏み、微小グループ復元データを生成する。このデータはオリジナルのグループ形状モデルと、深さ、幅などのパラメータや形状が比較される。

##### 2) シミュレーション結果

シミュレーション実験は、微小グループ形状として、深さ  $1.0 \mu\text{m}$ 、幅  $0.1 \mu\text{m}$  の三角形グループ、矩形グループを対象を行なった。これらは、サンプル数 256 点で離散化されて生成される。また、照射するレーザー光はスポット径  $30 \mu\text{m}$ 、波長  $0.633 \mu\text{m}$ 、強度分布はガウス分布型のを想定し、エクスポネンシャルフィルターの定数  $\gamma_c$  は  $0.008$  に設定した。

まず、図4は三角形グループについてのシミュレーション結果で、オリジナル形状、復元形状、光学的フーリエ変換面での光強度分布を示したものである。復元された形状はオリジナルのと良く一致しており、幅、高さなどのパラメータも近い値が得られた。また、図5は矩形グループについての結果で、復元された形状に多少乱れている部分があるが全体的にはほぼ一致しており三角形との区別は明確にできる。

#### 5. まとめ

- 1) 位相復元法の理論を応用した光学的逆フーリエ変換によって表面微細形状を復元する手法を明らかにした。
- 2) 三角形、矩形の微小グループ形状モデルによるシミュレーションを行い、提案した手法は両形状を区別できる程度の復元が可能であることを示した。

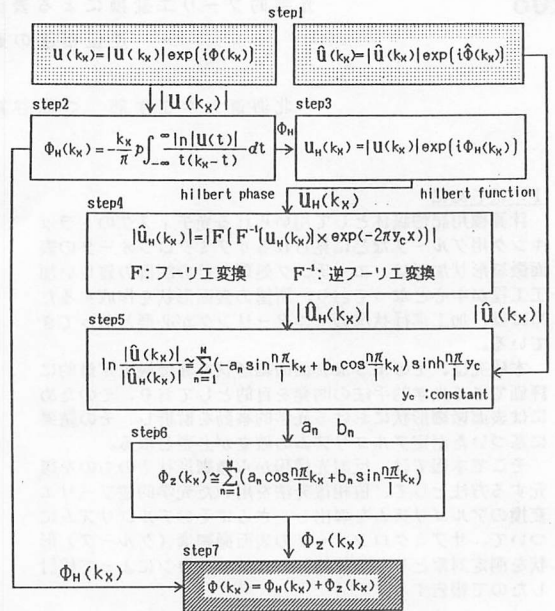


図2 位相  $\phi$  を求めるアルゴリズム

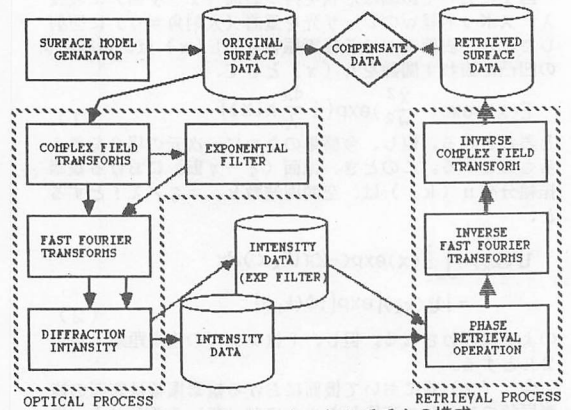


図3 シミュレーションシステムの構成

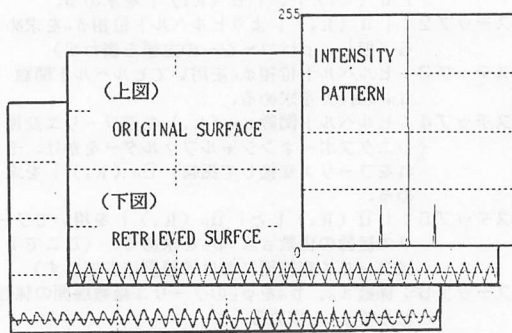


図4 三角形グループの復元

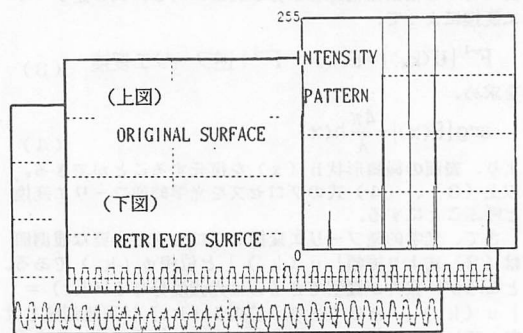


図5 矩形グループの復元

#### ◇参考文献◇

- 1) H. P. Baltès ed: Inverse Source Problem in Optics, (Springer-Verlag, Berlin, 1978)
- 2) N. Nakajima: Phase retrieval using the logarithmic Hilbert transform and the Fourier-series expansion, J. Opt. Soc. Am. A, vol. 5, No. 2, 257, (1979)