

# 位相変調型微分干渉法による 金属加工面のあらさ測定法に関する研究

筑波大学 物理工学系

助教授 谷田貝豊彦

(昭和63年度研究開発助成 AF-88023)

## 要 約

非接触表面粗さ計測法は、超精密加工技術の進展と共に重要性が増している。ここでは、表面粗さの定性的な評価法としては最も検出感度が高いといわれているノマルスキー型の微分干渉顕微鏡にフリンジスキヤンの技術を導入して定量化し、高精度な光表面粗さ測定法について述べる。

### 1. はじめに

超精密加工面の表面形状(特に表面粗さ)の計測は、加工方法、加工条件の良否を判定するうえで極めて重要である。近年、金属加工に於て必要とされる曲面に対する精度の要求はますます厳しくなり、併せて、加工技術のめざましい発展により、表面形状や粗さの計測精度に対する要求も厳しくなっている。ナノメートルから最近ではオングストローム領域の精度が必要とされるようになってきた。従来から、ナノメートル領域の表面粗さ測定法としては、触針法と光干渉法が知られている。しかし、オングストローム領域になると、唯一、X線散乱法が知られ、ある広がった領域での平均的な粗さのみが測定できた。

本研究では、光学的手段により非接触でしかも三次元的なオングストローム程度の精度を持った曲面形状及び表面粗さの計測法の開発を行う。本方法は、従来の表面粗さ計り大部分が点計測法であったのに対して、二次元の面的形状及び表面粗さを一度に測定できる。開発される装置を用いて、さまざまな表面粗さの指標の計算、従来の一次元的な表面粗さとの対応、二次元的な表面粗さと加工法の対応なども研究する。

非接触でしかも測定精度がオングストローム程度の表面形状評価法が開発されれば、その影響は、単にX線光学素子の測定評価にとどまらず、学術上きわめて多くの分野に波及と考えられる。高い感度で、表面の形状を測定しなければならない分野は多い。通常の光学ガラスの超精密加工、LSI用のウエハの加工、磁気ディスクヘッドの加工など先端超精密加工技術の分野をはじめとする工業的な応用分野、表面吸着、超薄膜の測定評価などの表面科学の分野における応用分野などが当面考えられる応用分野である。従来の表面粗さ計は、触針による接触式のものであ

った。触針式の表面粗さ計は信頼性は高いが、測定対象物に損傷を与えることが多く、ナノメートルを越える高い測定精度は期待できない。これに対して、光学的手段による表面粗さ計は、非接触でしかも高速、高精度で測定可能なため、超精密金属加工面の評価法として注目されている。特に、光波干渉を利用した方法は、二次元的に表面形状が干渉縞画像として測定できるため広く加工面の評価に利用されている。最近、干渉計の参照位相を変化させ、そのとき得られる何枚かの干渉縞画像をコンピュータに取り込み、表面形状を極めて精度よく計算できる方法が開発された。これが、フリンジスキヤン法である。測定精度の理論限界は $1/1000$ 波長(約5オングストローム)程度といわれている。

### 2. 測定原理

ここで開発を試みるのは、ノマルスキー微分干渉法に位相変調法を加味した新しい超高精度干渉顕微鏡システムである。従来からノマルスキー微分干渉法は、定性的には極めて高い検出感度を持つ測定法として知られていたが、本研究では、これを定量化することを試みる。最近ヘテロダイン法をはじめとしてさまざまな原理に基づく光学的表面形状評価法が開発されているが、本研究で開発する手法は、フリンジスキヤン法といわれる方法を採用して、ノマルスキー微分干渉法の定量化を行う。この方法は、相対位相の異なる、複数枚の微分干渉像をコンピュータに取り込み、表面形状に対応する物体の位相分布を精度よく計算で求めるものである。

#### 2.1 ノーマルスキー微分干渉顕微鏡システム

図1に装置の概略を示す、ノマルスキー微分干渉顕微鏡(図2)は、ノマルスキープリズムで入力波面を二つに分轄して、互いに微小な横ずれを与えて干渉させるものである。横ずれの量を $s$ とし、入力波面を $w(x, y)$ とすると、得られる位相は

$$\phi(x, y) = w(x, y) - w(x-s, y) \quad (1)$$

である。したがって、干渉縞の強度は、バイアス位相を $\delta$ として、

$$I(x, y, \delta) = a(x, y) [1 + \gamma(x, y) \cos \{\phi(x, y) + \delta\}] \quad (2)$$

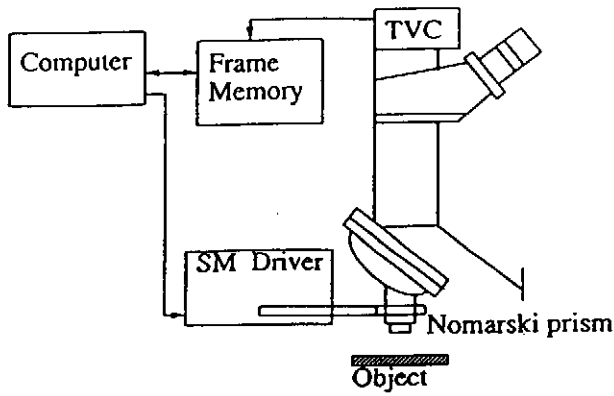


図1 ノマルスキー微分干渉顕微鏡システム

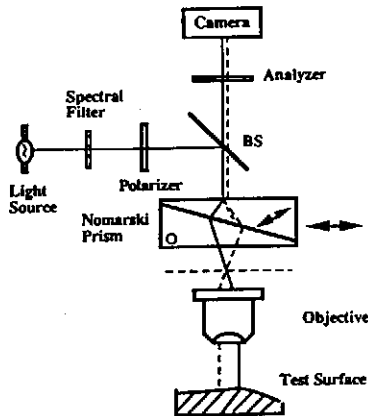


図2 ノマルスキー微分干渉顕微鏡の原理

フリンジスキャンを行うためには、干渉する二つの波面間のバイアス位相を変調しなければならないので、ノマルスキープリズムを横移動させている。このための微動装置はコンピュータ制御され、位相変調された微分干渉画像をTVカメラ、フレームメモリを介して計算機に取り込む。位相解析されたデータを積分すれば、表面形状分布が求まる。

## 2.2 フリンジスキャン干渉法

参照光の位相項を $\delta$ を変調する方法がフリンジスキャン干渉法である。この位相を検出するために、フリンジスキャン法では、

$$\delta_i = 2\pi i / N \quad (i=0,1,2, \dots, n-1) \quad (3)$$

を満たすようにN段階位相を変化させる。

現実の干渉計測においては、 $a(x,y), \gamma(x,y)$ は一定でなく、場所によって変化する。また、干渉縞の検出系の非線形性により、高次の項も含むことがわかる。このようなことから、単純に逆余弦関数を用いて、 $\phi(x,y)$ を計算できないことがわかる。

いま、(2) 式を $\delta$ についてフーリエ展開すると、

$$I(x,y,\delta) = C_0/2 + \sum C_j \cos j\delta + \sum S_j \sin j\delta \quad (4)$$

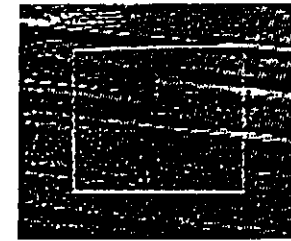
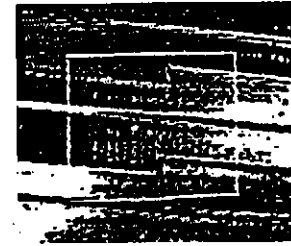
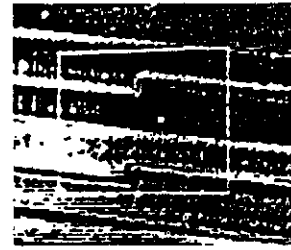


図3 位相変化による干渉縞変化

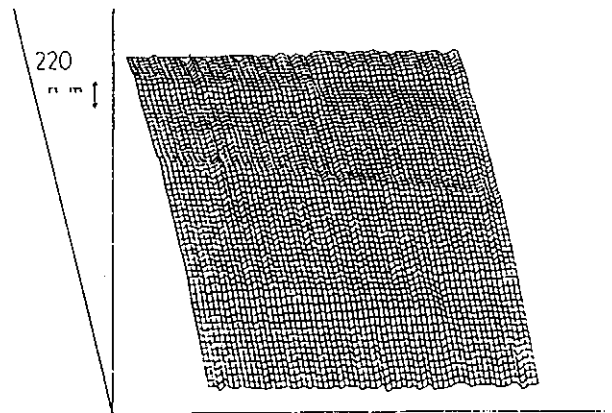


図4 測定結果

ここで、(3) 式を考慮して、

$$C_j = \sum I(\delta_i) \cos(2\pi i j / N) \quad (5)$$

$$S_j = \sum I(\delta_i) \sin(2\pi i j / N) \quad (6)$$

また、(2) 式は加法定理から、

$$I(x,y,\delta) = a(x,y) + a(x,y)\gamma(x,y) \times \cos\phi(x,y) \cos\delta + a(x,y)\gamma(x,y) \times \sin\phi(x,y) \sin\delta \quad (7)$$

とも書ける。

したがって、これらから、

$$\phi(x,y) = \text{atan}(S_1/C_1) \quad (8)$$

として、位相が計算できる。すなわち、位相 $\phi(x,y)$ を求めるには、参照光の位相を $\lambda/N$ きざみでN段階変化させ、干

縞の強度  $I(x, y, \delta_i)$  を  $N$  回測定し、これに  $\cos(2\pi i/N)$  と  $\sin(2\pi i/N)$  の重みをかけて加算したものの比をとり、これの  $\text{atan}$  を計算すればよい。

ここで、(8) 式には、干渉縞の平均強度分布  $\alpha(x, y)$  や縞のコントラスト成分  $r(x, y)$  は含まれていない。縞の解析精度を低下させるこれらの成分の変化の影響が自動的に補正されていることが、このフリンジスキャン法の特徴である。

## 2.2 形状の復元

計測される位相データは、測定物体の表面形状の微分であるので、これを積分して形状データに変換しなければならない。横ずらし方向が  $x$  方向であり、横ずらし量が微小であると、(1) より、測定位相から物体形状の  $x$  方向微分  $\Delta w_x(x, y)$  が得られ、これを積分すると、 $x$  方向の断面形状分布  $w_x(x, y)$  が計算される。同じく、横ずらし方向を  $y$  方向にして、 $y$  方向の断面形状分布  $w_y(x, y)$  を得る。両者の積分常数、傾斜誤差（形状微分分布の誤差）を最小にするようにして、物体の形状分布  $w(x, y)$  を決定する。

## 3. 測定結果

測定の一例として、ガラス基板上のフォトリジストパターンの深さを測定した。図3に参照光の位相変化による干渉縞の変化を示す。図4はその形状である。分解能 10nm 程度で測定できていることがわかる。

## 4. まとめ

ノマルスキー微分干渉顕微鏡を定量化した新しい表面形状と表面粗さ計測法を提案した。現在、深さ分解能 10nm 程度が測定できている。今後は、位相再生のためのソフトウェアの整備を進め、表面あらさと測定結果の定量的な検討を行う必要がある。

## 発表論文

- (1) X. Tian and T. Yatagai. "Phase Estimation in 2 - D Differential Interferometry, " Technical Digest of 51th Japanese Applied Physics Conference, Morioka, Japan (1990) p.774.
- (2) W. Shimada, T. Sato, T. Yatagai, "Optical Surface Microtopography Using Phase-Shifting Nomarski Microscope, " Proc. SPIE, Vol. 1332, (1991).
- (3) T. Yatagai, "Applications of Interferometry and Automated Inspections in Japan, " Proc. SPIE, Vol. CR46 (1992).
- (4) X. Tian and T. Yatagai, "Optical Surface Topography Measurement System," to be published in Optical Engineering (1993).