



上下振動の影響を受けない高精度粗さ 測定法 (第2報)*

—完全な平面を必要としない断面形状の測定法—

安達正明** 三木秀司*** 鈴木紀生*** 中井康秀† 川口 格††

Precision Profiling Method Insensitive to Vertical Vibrations (2nd Report)
—A Method Need not a Perfect-flat Plane—

Masaaki ADACHI, Hideshi MIKI, Norio SUZUKI,
Yasuhide NAKAI and Itaru KAWAGUCHI

When one will measure the precision profiles of super smooth surfaces using an optical interferometer, a perfect-flat reference mirror should be used. However, it is impossible to obtain such a mirror. For the case using a stylus method, a perfectly-straight-moving slide table should be used. It is impossible to obtain that table too. In this paper, We propose the optical precision profiling method which does not need a perfect-flat plane. This method is developed on the optical skid method previously reported (the 1st report). For the surface data obtained using the optical skid method, the amplitude of low spatial-frequency components were attenuated noticeably and the data were used as the roughness profiles. This paper will make it clear that: (1) One can theoretically calculate the exact attenuation rate of frequency component from the positions and the sizes of the photo-detectors used in the sensor head of the optical skid method. (2) One can completely retrieve the surface profile by the digital filtering using the calculated attenuation rate. In an experiment, a profile of a step height standard is retrieved using the method mentioned above. And a waviness profile of a mirror obtained using this method is compared with the profile measured using Talystep.

Key words: optical method, profile measurement, smooth surface, digital filtering, vertical vibration

1. 結 言

断面形状の測定を移動機構を用いずに光干渉像の解析から行う方法としては、フィゾー干渉計やトワイマングリーン干渉計等を用いる方法が知られており¹⁾、一部は製品化もなされている²⁾。一方、移動機構を用いる方法では、接触式としてはタリサーフやデクタク等が、そして非接触式としては非接触微細形状測定器 (HIPOSS)³⁾ やサーフコム 920 A⁴⁾ 等が測定装置として知られている。次世代の表面粗さ測定器として英国 NPL から発表予定とされるナノサーフ 2⁵⁾ は移動機構を用いる接触式装置に属している。そして、これ

らすべての装置はその方式を問わず高精度測定を実現するために非常に平面性の良い面、すなわち生産時においてメーカーが大量供給可能な最も理想的な平面の一部に使用している。前者ではそれを基準参照面として、後者ではそれを移動基準ガイド面として用いており、これらの完全な平面からのずれは、直接に測定誤差として影響するからである。ゆえに、田中は高精度測定を行う場合、これらの誤差を抑えるための工夫が重要になることを指摘している⁶⁾。

もし、理想的な平面を用いずにこの断面形状を高精度に測定できるようになれば、加工技術に与える影響は大きいと思われる。例えばこの測定法をフィードバック制御やフィードフォワード制御と組み合わせると、上下変動や傾斜変動を持つ送り機構であっても非常に高精度に加工物を仕上げることができ、コストパフォーマンスの良い高精度形状加工技術が工業的に可能となるからである。

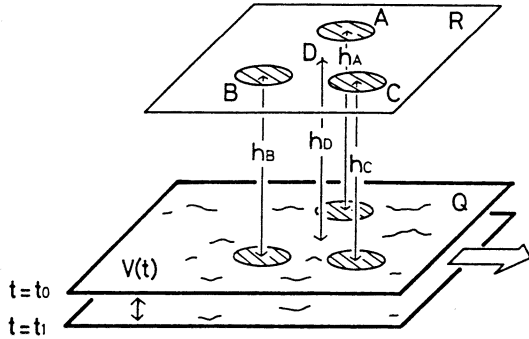
* 原稿受付 平成元年7月28日、昭和63年度精密工学会
秋季大会学術講演会 (昭和63年10月5日) にて発表

** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 正 会 員 (株)神戸製鋼所 (神戸市西区高塚台 1-5-5)

† (株)レオ技研 (神戸市垂水区神磯台 5-22-8)

†† 正 会 員 大阪府立大学工学部 (堺市百舌鳥梅町 4-804)



$$X_D = h_D - (h_A + h_B + h_C) / 3$$

Fig. 1 Principle of the profile measurement for the optical skid method. Q is a surface vibrating with the amplitude $V(t)$. R is a static plane. h_i ($i=A, B, C, D$) is the distance between them. X_D is the output of the optical skid method

本論文では第1報で述べた「上下振動の影響を受けない高精度粗さ測定法——オプティカルスキッド法の提案⁷⁾」を断面形状の測定が可能なる方法へと発展させている。この方法は、上下振動の影響を受けず、さらに用いる移動テーブルの上下変動や傾斜の変動にも影響されずに、断面形状の測定を行うことができるものである。実験では標準段差試料の測定や光学ミラー面のうねり曲線の測定を行った。ただし、測定長はテーブルの移動長とコンピュータメモリの制限から最大で4mmとなっている。

2. 断面曲線の測定原理

第1報⁷⁾では上下振動の影響を受けずに粗さ曲線を高精度に測定するためのオプティカルスキッド法と呼ぶ新しい方法を提案した。この方法は図1に示すように、測定面を右方向に動かしながら、測定領域の中心部の一点Dにおける高さ h_D と周辺部のA, B, Cにおける平均高さ $(h_A + h_B + h_C) / 3$ を光干渉を利用して光センサで測定し、それらの差 $\{X_D = h_D - (h_A + h_B + h_C) / 3\}$ を取ることを測定原理とした。ゆえにこの方法は、図2に示すように実際の断面形状 h_D に対し、測定される信号 X_D の低周波数成分が減衰する効果を与えた。これをカットオフ特性と呼ぼう。

我々は任意の波長に対しこのカットオフ特性を正確に求めることができれば、次のことが可能になると考えた。すなわち、この効果をコンピュータを使用したデジタルフィルタリング処理を用いて打ち消すことにより、測定された粗さ曲線 X_D から断面曲線 h_D を求めることができる。

そこでオプティカルスキッド法のカットオフ特性の

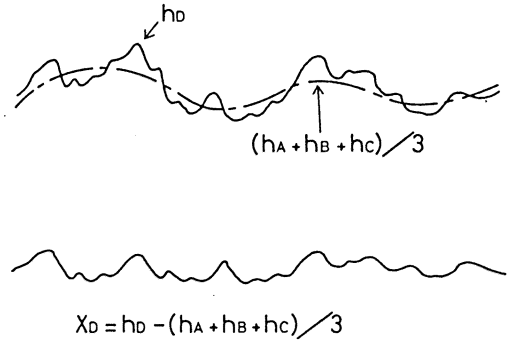


Fig. 2 Schematic illustration about a cutoff effect of low spatial-frequency components due to the optical skid method: h_D is the surface profile and X_D is the output of the optical skid method

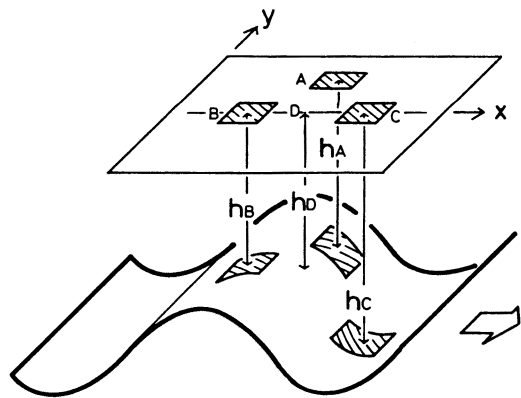


Fig. 3 Arrangement of photo-detectors in a new sensor head. A lower curved surface is a sinusoidal surface model which is used to calculate the exact attenuation rate for the optical skid method

理論的な計算を以下に行った。ただし、当面は測定対象とする面は測定方向にのみ高さが変化し、測定方向と垂直方向には変化していない一次元平面であるとする。この条件は、実験で用いるセンサヘッドの形状をそのまま以下の理論で扱うことにしたところから生じる。センサヘッドを特定の形状に変えることにより、最終的にはこの条件を取り除くことができる。

第1報で用いたセンサヘッドは図1のように、周辺部の高さを計算するための h_A, h_B, h_C の測定領域が測定点Dに対して等距離・等角度となる場合であった。このヘッドの形状のままでは、断面形状の測定は難しくカットオフ特性の計算も複雑になる。そこで本報で用いたセンサヘッドは製作、計算共に簡単になる図3の構造にした。この場合、周辺部の高さは h_B と h_C から求め、 h_A は h_B, h_C とあわせて測定面と参照面を平行にする制御⁷⁾に用いるだけである。

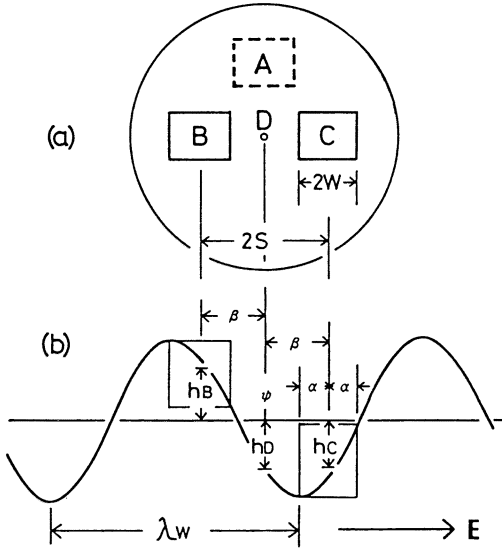


Fig. 4 The areas of a sinusoidal surface measured by photo-detectors in the new sensor head. (a) new sensor head. $2W$ is the lateral size of the photo-detectors and $2S$ is the space between them. (b) sinusoidal surface of wavelength λ_w . ψ is the phase of the sinusoidal change. α and β are phase differences for W and S

最初にこのセンサヘッドを用いて、図のように振幅1を持ち単一波長の正弦波型変化を横方向に持つ面を測定した時の $X_D = h_D - (h_B + h_C)/2$ を計算した。図4において、測定面の正弦波型変化の波長を λ_w 、また光センサDの位置における正弦波形の位相を ψ 、そして四角形の大きな測定域を持つ光センサB,Cの横方向の検出幅を $2W$ 、またBとCの間隔を $2S$ とし、測定面はEの方向に移動するとした。そして、 X_D の波長による影響を調べた。いま $\alpha = 2\pi W/\lambda_w$ ならびに $\beta = 2\pi S/\lambda_w$ を用いると、図において光センサBが測定する平均高さ h_B は次のように計算できる。

$$\begin{aligned}
 h_B &= \frac{1}{2\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} \sin(\psi - \beta + x) dx \\
 &= \frac{1}{2\alpha} [-\cos x]_{\psi - \beta - \alpha}^{\psi - \beta + \alpha} \\
 &= \frac{1}{2\alpha} \{ \cos(\psi - \beta - \alpha) - \cos(\psi - \beta + \alpha) \} \\
 &= \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \sin(\psi - \beta) \tag{1}
 \end{aligned}$$

ゆえに、Bの中心部の一点において元の波形が持つ振幅 $\sin(\psi - \beta)$ が $\sin \alpha/\alpha$ 倍に減衰することが分かる。同じく光センサCが測定する高さ信号は次式となる。

$$h_C = \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \sin(\psi + \beta) \tag{2}$$

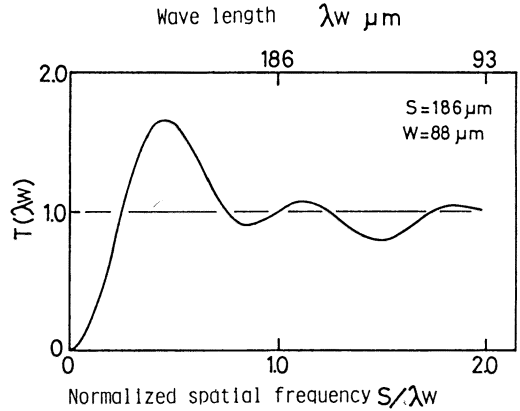


Fig. 5 A filtering function $T(\lambda_w)$ calculated from the space $S=186 \mu\text{m}$ and lateral size $W=88 \mu\text{m}$ for the photo-detectors, whose values are converted at the surface plane

この二つの光センサが測定する平均高さは $(h_B + h_C)/2$ である。ゆえにこのレベルをゼロとする X_D は次式となる。

$$\begin{aligned}
 X_D &= \sin \psi - \frac{1}{2} (h_B + h_C) \\
 &= \sin \psi \left[1 - \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \cos \beta \right] \tag{3}
 \end{aligned}$$

そこで $T(\lambda_w) = 1 - \sin \alpha \cdot \cos \beta / \alpha$ とすると

$$X_D = \sin \psi \cdot T(\lambda_w) \tag{4}$$

と書けるため、 $T(\lambda_w)$ は波長 λ_w に関するフィルタリング関数 (カットオフ特性を表す関数) となる。この $T(\lambda_w)$ に、実験で用いる光センサB,Cの物理的サイズ $2W=3.5 \text{ mm}$ 、 $2S=7.44 \text{ mm}$ を観測面上の寸法に換算した W と S の値 $W=88 \mu\text{m}$ 、 $S=186 \mu\text{m}$ を代入し図示すると図5となる (レンズの倍率は20倍である)。この図においてx軸は $1/S$ で規格化されている空間周波数であり、 S/λ_w が小さくなると $T(\lambda_w)$ はゼロに近づき、また S/λ_w が大きくなると振動しながら1に近づくことが分かる。

ところで、図5は測定面が単一波長の正弦波型変化を持つとして計算したフィルタリング関数である。一般に、任意の形状はフーリエ変換理論によると正弦波型変化の有限個もしくは無限個の和で与えられる。正弦波型変化の和となる場合においても、式(1)で用いた積分は和との交換法則を満たす。ゆえに、上記の議論は各フーリエ成分に関してそのまま成立する。このため $T(\lambda_w)$ は任意の形状に関し、このセンサヘッドのカットオフ特性を正確に表す関数となる。

そこで、 $T(\lambda_w)$ をコンピュータ内で発生させ、この関数のマイナス1乗となる関数を計算し、FFT

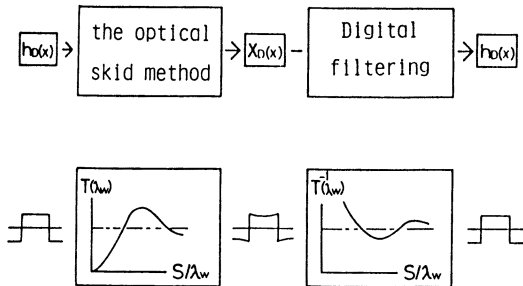


Fig. 6 A schematic block diagram for the method of obtaining the profile $h_D(x)$ from the output $X_D(x)$ of the optical skid method

(高速フーリエ変換)を用いて得られる $X_D(x)$ のフーリエスペクトルにこれを掛け、さらに逆FFTを行うと低周波数成分が回復でき断面曲線が得られる。これらの処理をブロック図で示すと図6になる。すなわち、矩形の凹凸を有する $h_D(x)$ をオプティカルスキッド法を用いて測定すると、フィルタリング関数 $T(\lambda_w)$ のカットオフ特性により、 $X_D(x)$ となり、低周波数成分が減る。しかし、コンピュータを用いて $T^{-1}(\lambda_w)$ のフィルタリングを行うと、低周波数成分を回復でき元の $h_D(x)$ を得る。

ところで、図3もしくは図4のセンサヘッドの形状では y 方向にも変化を持つ凹凸面の x 方向の断面曲線は求めることができない。この理由は、 D は y 方向に広がりを持たない一点の高さの測定であり、 B, C は広がりを持つ領域の平均高さの測定だからである。すなわち、 B, C の測定値にその測定域で積分平均されて影響する y 方向の変化の中に、測定面が x 方向に沿って S だけ移動して D の所に来た時、 D の測定値に影響しない凹凸成分が存在するから。しかし、 B, C として y 方向に D と同じ広がりを持つ光センサを用いれば、すべてのセンサは完全に同じ領域を測定し、断面形状の測定は可能となる。このことは、これまでに述べてきた議論から明らかである。

さらに、以上の測定において入力データは測定点の高さと周辺部の高さの差である。このため、移動テーブルの直進に伴う上下の変動や傾斜の変化は全く影響しない。すなわち、移動テーブルの直進性に影響されないで超精密面の断面曲線の測定が行い得る。

3. 実験

3.1 測定装置

実験で用いた測定装置は、ミロウ型対物レンズ（光干渉のための参照面をレンズの内部に持つ）を用いるもので、第1報⁷⁾で述べたものとほぼ同じである。ただし、センサヘッド形状のみが異なっている。用いた

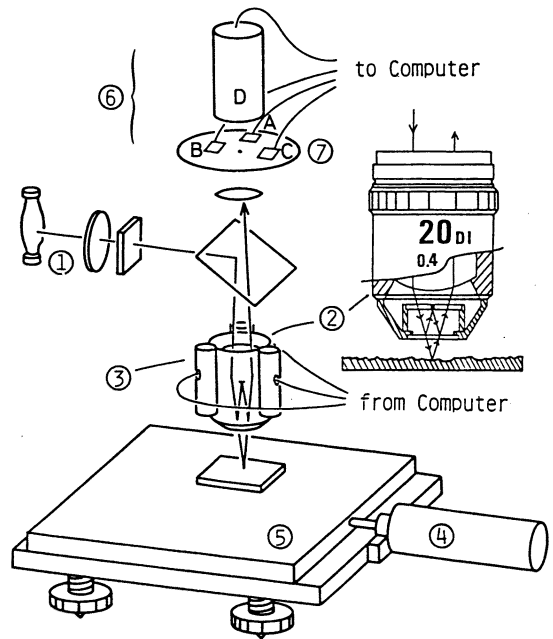


Fig. 7 Optical system of a profiling instrument
① extra-high-pressure mercury lamp. The light from this lamp is interference filtered ($\lambda=546\text{ nm}$), ② Mirau objective, ③ piezo positioners, ④ linear actuator, ⑤ specimen table, ⑥ new sensor head which is composed of a center photo-detector and three surrounding photo-detectors, ⑦ image plane

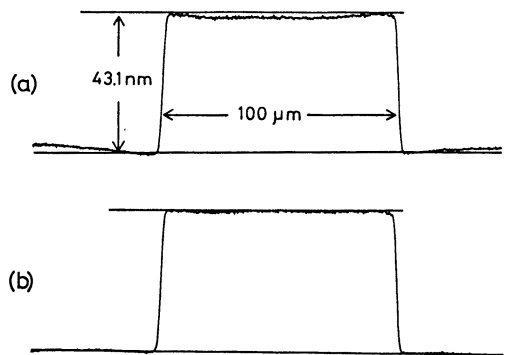


Fig. 8 Profiles by a step height standard
(a) $X_D(x)$ measured using the optical skid method, (b) $h_D(x)$ obtained using the digital filtering of $T^{-1}(\lambda_w)$

装置の概要図を図7に示す。詳細は本報では省く。

3.2 測定結果

x 方向にのみ大きな変化を持つ試料として標準段差試料を測定した時の結果を図8に示す。(a)は $X_D(x)$ であり、(b)は $X_D(x)$ の低周波数成分を回復した $h_D(x)$ である。この試料はほぼ階段状の形状変化を持っている⁸⁾。(b)ではこの形状がほぼ回復できている。ゆえに、この結果から断面曲線の測定が正しく行

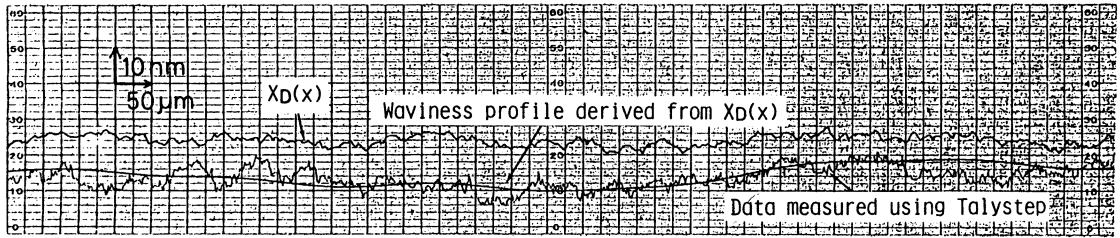


Fig. 9 The waviness profile derived from proposed method

い得ることが分かる。ところで、階段状の形状変化はフーリエ変換理論によると、空間波長が異なる各種の成分を持つことが知られている。そこで、この測定結果は階段形状以外の各種の形状変化にもこの方法が有効であることを示す。

次に、このセンサヘッドのままに xy 面内に等方的な変化を持つ超精密試料のうねり曲線の測定を行った。等方的な変化を持つ超精密面では、センサ B, C の y 方向の広がり範囲では凹凸に大きな変化はないと考えられる。このため、測定方向を任意の方向に取っても、B と C が測定する平均高さは、 y 方向の幅が非常に小さい場合の B と C が測定する高さと同様に同じと考えられるからである。

光学ミラー面を測定して得られた低周波数成分が減衰したままの $X_D(x)$ 、ならびにタリストップを用いてほぼ同じ領域を測定して得られた断面曲線を図 9 に示す。タリストップ測定値には大きなうねり成分が見られるが、 $X_D(x)$ にはあまり見られない。そこでデジタルフィルタリング処理で、 $X_D(x)$ のすべての低周波数成分を回復すると同時に $200 \mu\text{m}$ 以下の周期を持つ高周波数成分を除去して得られるうねり曲線をタリストップ測定結果に重ねて示した。両者は全く同じ箇所の測定ではないので細部が異なるが、うねり成分はほぼ同じ情報を持つと見ることができる。

また、オプティカルフラット面を測定して得られた $X_D(x)$ 、ならびに図 9 の場合と同様な方法で $X_D(x)$ から得られたうねり曲線を図 10 に示す。数分後に再度 $X_D(x)$ を測定し、これから得られたうねり曲線を同じく図 10 に点線で示した。ほぼ同じ形状が得られており、この測定法が再現性の良いことを示している。測定領域は約 4 mm である。

4. 考 察

本章で用いたデジタルフィルタリング処理は図 5 で示される $T(\lambda_w)$ の値を 1 に戻す処理を行うため、低い空間周波数成分に関して大きな増幅を行う。この結果、低周波数成分の S/N (信号強度対雑音強度比)

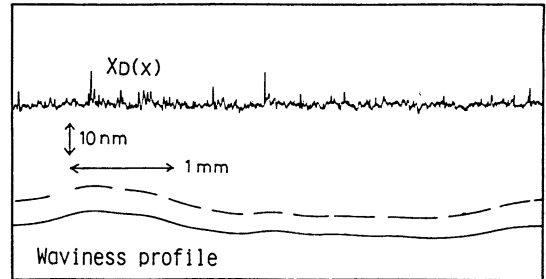


Fig. 10 Double scan data about a waviness profile of an optical flat

の良いことがこのうねり測定法に必要な条件となる。通常の測定における電気雑音に関しては、熱雑音⁹⁾ならびに散弾雑音¹⁰⁾、そしてフリッカ雑音¹¹⁾が良く知られている。これらの中でフリッカ雑音は低周波数成分が相対的に大きく、最も影響するようになる。しかし、図 10 を見る限り測定結果の再現性は良く、あまり影響がないようである。そのほかに影響が考えられるものとしては、超低周波数雑音の一種と考えることもできる信号増幅回路のドリフトがある。この影響は図 10 の繰返し測定には現れにくいものである。しかし、超低ドリフト仕様のオペアンプ等の使用により、この種の雑音は基本的に防げると考えられる。

次にミロウ型対物レンズ内の参照面の粗さやうねりの影響を考える。この方法では光センサ D が測定する干渉光は、一方向に移動し変化する測定面の一点とミロウの参照面の一点とから作り出されるが、参照面の一点は粗さ計測中ずっと同じ部分が使われる。このため、参照面の粗さは h_D に影響しない。光センサ B, C が測定する干渉光では参照面のある大きさを持つ部分が使われる。この場合、参照面の粗さはセンサ面内の光路差の分布に影響する。しかし粗さ計測においては、B, C は光路差の面内分布ではなく光路差の平均を測定している。ゆえに、参照面の粗さは測定結果に影響しにくい。参照面にうねりがある場合は $X_D = h_D - (h_B + h_C)/2$ は測定域全体に対して一定の直流成分が余分に加算されたような効果を与える。この成分

は逆FFTを行った段階で測定面全域が一定の曲率半径を有するかのような誤差を生じさせる。しかし、この誤差は装置が同じであれば常に一定であり、形状の分かっている長い試料を測定した結果を用いて補正することが可能と考える。

最後にセンサヘッドの製作過程で光センサの配置に狂いが生じ、 W や S が設計値と異なってしまった場合を考える。これは真の $T(\lambda_w)$ が存在するが、それはあらかじめ分かかっていなく、コンピュータ内で真の $T(\lambda_w)$ を発生できない場合に相当する。この場合は配置の誤差補正を目的とした測定実験により $T(\lambda_w)$ を求めることができる。すなわち、すべての空間周波数成分がゼロでない特定の試料を測定した時の X_0 と他の手段で求めた k_0 から $T(\lambda_w)$ の測定を行うのである。

以上の議論から分かるように、この方法を用いると完全な平面を用いなくて断面形状を測定できると考えられる。完全な形状計測を実現するためには厳密には細かい種々の問題点はまだ残る。しかし少なくとも、高精度形状計測においてこれまで必要と考えられてきた完全平面（機械加工では基本的に実現が不可能）の条件が、オプティカルスキッド法とデータ処理を組み合わせることで解決できることを示し得たと我々は考える。

5. 結 言

一般に、超精密面の形状を高精度に測定しようとする場合は理想的な平面が必要となる。しかし、それらを得ることは現実には非常に難しい。ここで述べた方法は、理想的な参照ミラー面を必要とせず、さらに移動型試料テーブルの直進性ならびに床振動の影響を受けないで、超精密面の断面形状を高精度に測定する方法についてである。内容をまとめると以下になる。

- (1) 断面形状測定用のセンサヘッドを提案し、このヘッドとオプティカルスキッド法を用いて形状

を測定した場合のカットオフ特性を計算する方法を示した。

- (2) このカットオフ特性はコンピュータによるデジタルフィルタリング処理によって回復できることを理論的に示した。
- (3) x 方向にのみ変化する試料の形状測定が上記の方法で実際に可能であることを実験で示した。
- (4) xy 方向に変化を持つ面に関しても、その面が超精密面であり変化が等方的であるならば、うねり成分を測定できることを実験で示した。

最後に、本研究の相当部分は著者の一人が兵庫県立工業試験場に勤務していた時に行われたものであり、本研究の遂行に種々の協力を頂きました試験場の皆様深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 谷田貝豊彦：光干渉計測法の最近の進歩，精密機械，51，4（1985）695。
- 2) 例えばIR3システム，WYKO社製造，松質機器(株)が販売。
- 3) (株)小坂研究所が販売。研究論文は小沢則光，河野嗣男，三井公之，武者 徹，宮本紘三：非接触光学式微細形状測定ヘッド(HIPOSS-1)，精密工学会誌，52，12（1986）2080。
- 4) (株)東京精密が販売。
- 5) 宮田威男：超精密加工技術と短波長光学部品への応用，応用物理，58，6（1989）842。
- 6) 田中 充：最近のナノメートル計測技術，光波干渉計について，応用物理，56，6（1987）734。
- 7) 安達正明，三木秀司，中井康秀，川口 格：上下振動の影響を受けない高精度粗さ測定法（第1報）——オプティカルスキッド法の提案，精密工学会誌，56，1（1990）140。
- 8) STEP HEIGHT STANDARD, VLSI Standard Incorporated, Model No. SHS-0440 A, Serial No.278-003-004 C.
- 9) 玉虫文一ほか：理化学辞典（第3版増補版），岩波書店（1981）998。
- 10) 同上，p. 527。
- 11) 同上，p. 1176。