



研究論文

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 —

安達正明** 三木秀司*** 中井康秀† 川口 格††

Precision Profiling Method Insensitive to Vertical
Vibrations (1st Report)

— A Proposition of an Optical Skid Method —

Masaaki ADACHI, Hideshi MIKI, Yasuhide NAKAI and Itaru KAWAGUCHI

A novel optical profiling method is proposed, which is nearly insensitive to vertical vibrations and able to measure the roughness of supersmooth surfaces on a long track. This method makes simultaneous height measurements of both a measurement position and its surroundings and perform subsequent digital subtraction of the latter from the former to obtain the roughness data. An instrument incorporated with this method is shown to have a height sensitivity of 0.1 nm under normal vibrational circumstance (0.4 cm/s^2). Data obtained from measurements of a disk substrate, a mirror, an optical flat and a silicon wafer are included.

Key words : precision roughness measurement, optical method, supersmooth surface, interference microscope

1. 緒 言

超精密加工技術の民生機器や工業製品への応用はますますその範囲を広げつつある。と同時に0.1 nm R_{rms} 近くの面を加工する技術への展開も、近年進んできている¹⁾。これらの状況から振動環境下にある生産現場においても簡単にサブ nm オーダの形状が評価できる技術の必要性は今後急速に高まると予想される。

光を用いた粗さ評価法は非接触で高精度測定を可能にする点から上記の技術の実現に有望であり、これまで種々の方法が提案され、そして一部は製品化されてもきている^{2)~6)}。WYKO社が生産するしま走査法を用いる装置⁵⁾は測定領域を目で確認しながら形状を三次元表示できることから広く用いられている。しかし、サブ nm オーダの形状評価にあたっては環境の微小な上下振動や参照ミラーの粗さが無視できない測定

誤差を生じさせること、測定長が9 mm以下に制限されることなどの問題点を有している。また、ZYGO社で製品化されているZeeman Laserを用いるヘテロダイン干渉計測法⁶⁾は上下振動の影響を受けないが、測定箇所は最も長い場合でも直径1 mmの円周上と非常に狭い範囲に制限される。一方、小坂研究所や東京精密が販売している装置⁷⁾⁸⁾は測定長に原理上の制限はないが上下振動の影響を受けやすい。以上の点から縦分解能0.1 nmを持ち、広い横方向測定範囲を持つ光を用いた装置の開発が今後の課題とされている⁹⁾。

本論文で提案する方法は、0.1 nm オーダの縦分解能と広い横方向測定を可能とする方法である。この方法は光干渉法と差動法を組み合わせ、観察面の上下振動の影響ならびに参照ミラーの粗さの影響を受けないようにした方法¹⁰⁾を長い測定長にわたって測定できるように改善したものである。当然ではあるが、横方向の分解能と測定長との比に関してはしま走査法のような制限は一切ない。

2. 粗さ測定の原理

図1に示すようにある観察面Qを考え、この観察面を一定速度で右方向に移動させながら、静止した特定の高さの基準面RからQ上の一点までの距離 h_0 を

* 原稿受付 平成元年6月28日、昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月29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)

† 正会員 (株)レオ技研(神戸市垂水区神稜台5-22-8)

†† 正会員 大阪府立大学工学部(堺市百舌鳥梅町4丁804)

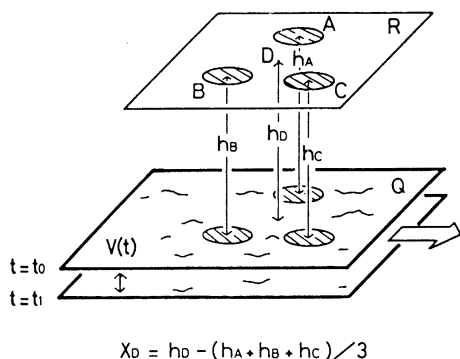


Fig. 1 Principle of the measuring method
 Q is a surface should be measured. R is a static plane.
 $h_i (i=A, B, C, D)$ is the distance between them. $V(t)$ is
 distance fluctuation caused by vibrations. X_D is the
 output of the optical skid method and is insensitive to
 $V(t)$

連続的に測定すると、断面曲線を得る。しかし、外部振動 $V(t)$ によりこの観察面 Q が上下に振動していると、得られる測定信号は断面曲線に $V(t)$ が重畳したものとなる。そして、この信号から振動振幅以下の粗さを正確に求めることは難しい。

距離 h_D を測定する基準面中の位置 D の近傍に、A, B, C のある大きさを持つ領域を考え、この領域から見た観察面までの平均距離を h_A, h_B, h_C とする。すると $(h_A + h_B + h_C) / 3$ は測定点の近傍の平均高さを意味する式となり、この式も $V(t)$ を含む。そこで h_D と $(h_A + h_B + h_C) / 3$ の差、すなわち $h_D - (h_A + h_B + h_C) / 3$ で与えられる X_D を考え（差動法）、観察面を一定速度で移動させながら X_D を測定すると、 $V(t)$ の影響を受けないで周辺部の高さをゼロとする粗さ曲線が得られる。この測定法はスキッドを用いた触針測定に類似する。ここでは各領域における距離の測定を光学式に行おうとするものであるから、我々はこの方法をオプティカルスキッド法と名付けた。

3. 実験

3.1 測定装置の構成

h_A, h_B, h_C, h_D の高さを光を用いて非接触に測定するために、基本光学系にミラー型の干渉顕微鏡を用いた。そして、測定したい領域の干渉光強度を4つの光センサで測定し、その値から観測面の高さを求める手法を取った。ただし、干渉を利用して微小高さを高精度に測定しようとする場合、光路差の変化に対して光干渉強度が大きく変化するように、光路差を波長の(整数+1/4)倍近傍に調整する必要がある。またミラー型の干渉顕微鏡では、参照面と観察面が異なる支持系で支えられるため、両支持系の振動には振幅と位

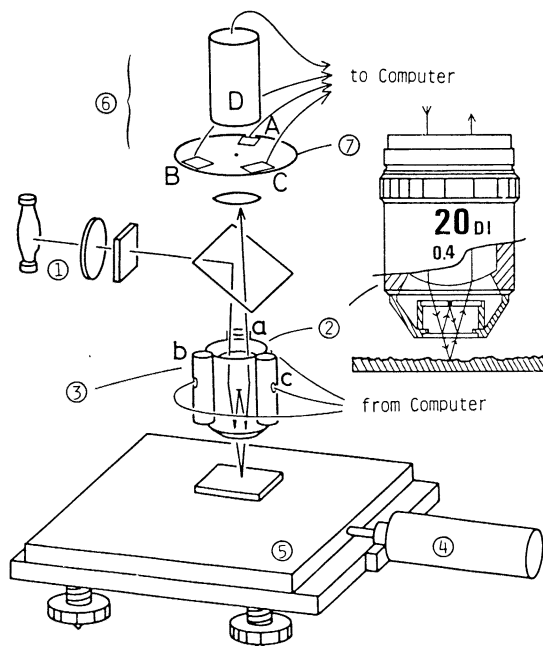


Fig. 2 Optical system of a profiling instrument
 ① extra-high-pressure mercury lamp. The light from
 this is interference filtered ($\lambda=546 \text{ nm}$), ② Mirau objective,
 ③ piezo positioners whose stroke is $25 \mu\text{m}$, ④ linear
 actuator whose moving velocity is $26 \mu\text{m/s}$, ⑤ specimen
 table, ⑥ sensor head which is composed of a center light
 detector and three surrounding light detectors, ⑦ image
 plane

相のずれがあり、光路差は外部の振動により簡単に变化する。そこで、対物レンズをピエゾ素子を用いて支持し、ピエゾ素子を通して干渉画像の光路差を波長の(整数+1/4)倍にコンピュータで連続制御することにした。実際には観察面は三次元であるため、観察面に対する参照面の傾きも二つの成分を持ち、そのため光路差の制御には3個のピエゾ素子が要る。

実験装置の概要を図2に示す。図2において①は100 Wの超高圧水銀ランプであり、この光は透過波長 $\lambda=546 \text{ nm}$ の干渉フィルタを介して準単色光にされる。②は20倍で $\text{NA}=0.4$ (分解能 $=0.6 \times \lambda / 0.4 \approx 0.8 \mu\text{m}$) のミラー型対物レンズである。このレンズは内部に参照ミラーを持ち、参照波面は対物レンズ前方のハーフミラーとレンズの直前に設けられた小さな参照ミラーによって作られ、観察面で反射された光の波面と干渉する。③の a, b, c はピエゾ素子であり、500 V の印加電圧で約 $25 \mu\text{m}$ の伸びを持つ。このピエゾ素子が対物レンズの姿勢、結果として参照面の姿勢を制御する。対物レンズへピエゾ素子を取り付けるための取付具の構造を図3に示す。④は試料を水平方向へ動かすためのリニアアクチュエータであり、26

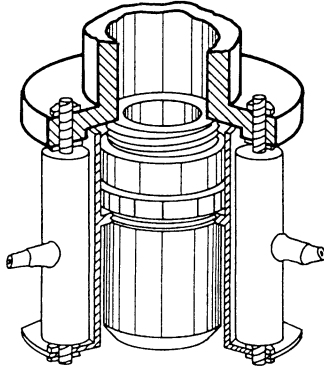


Fig. 3 Schematic diagram of an attachment for the Mirau objective and the piezo positioners

$\mu\text{m/s}$ での一定速度移動が行える。⑤は④を組み込んだ試料テーブルである。⑥は光センサヘッドである。干渉像は⑦の面上で結像する。結像した光の内、中心部の $50\ \mu\text{m}$ 径（観察面上では $2.5\ \mu\text{m}$ 径に相当する）のピンホールを抜けた光のみがフォトマルDにより電気信号に変換され、 h_b に関する信号となる。また、 $3.5\ \text{mm} \times 3.0\ \text{mm}$ の開口を持つシリコンフォトディテクタA, B, Cは $8.0\ \text{mm}$ 間隔で並べられており、これで光電変換された信号は、 h_a, h_b, h_c に関する信号となる。なお、この対物レンズによる視野は約 $800\ \mu\text{m}$ である。

3.2 測定手順ならびに干渉計の制御方法

粗さの測定に先立ち、コンピュータを用いての光路差制御に必要な、干渉光強度等の装置のパラメータを最初に計測する。手順として、まず干渉像内の干渉じまが $1/2$ 波長以内におさまるように、試料表面をミロー型対物レンズの参照面にはほぼ平行に調整する。次に、コンピュータからピエゾ素子を駆動し対物レンズを垂直方向に1波長分だけ動かす。この時、光センサヘッドの各光センサは図4に示されるような干渉光強度の正弦波型変化を測定できる。図中の Y_{\max} と Y_{\min} は最大光強度と最小光強度、またPとP'は変曲点である。この測定で得られる各々の光センサにおける Y_{\max} と Y_{\min} ならびにその時のピエゾ出力値が、干渉計の制御に必要なパラメータである。

実際の粗さ測定においては、これらのパラメータを用いたピエゾ素子による制御動作（後で述べる）により、干渉像の平均光路差は図4のP点近傍に制御される。試料面の凹凸を最大の感度でもって干渉光強度に変換できるこの状態において、光センサヘッドは測定点Dとその周辺部A, B, Cの平均光強度を電気信号に変換する。この電気信号 I_i ($i=a, b, c, d$)は増幅された後、4-Channel 12 bit A/D変換器によって順次

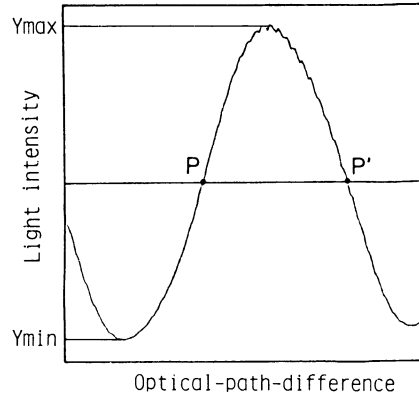


Fig. 4 Light intensity change at the image plane that is brought by the drive of piezo positioners which can vary the optical-path-difference

デジタル化されコンピュータに入力される。コンピュータは各センサの Y_{\max} と Y_{\min} を用いて、各センサの位置における光路差のP点からのずれ O_i ($i=a, b, c, d$)を次式で計算する。

$$O_i = \left(I_i - \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{2} \right) \left\{ \frac{\lambda}{\pi(Y_{\max} - Y_{\min})} \right\} \quad (1)$$

この O_i は図4のP点近傍の変化が直線であると近似して計算される量である。この式を用いて得られる各センサ信号におけるずれ O_a, O_b, O_c, O_d は h_a, h_b, h_c, h_d の2倍となり、この値を用いて次式の X_D を計算する。

$$X_D = \frac{1}{2} \left\{ O_d - \frac{1}{3} (O_a + O_b + O_c) \right\} \quad (2)$$

この X_D は周辺部の高さをゼロとする時の測定点の高さである。それ故、 X_D は床振動ならびに空気の揺らぎ等の影響をほとんど受けない。また測定範囲は、ゼロレベルを基準として $\pm 1/8$ 波長、すなわち約 $\pm 68\ \text{nm}$ を持つ（最終的な高さは $\sin^{-1}(8X_D/\lambda) \times \lambda/4\pi$ を行って求める。このことによって図4のP点近傍の変化を直線とみなすことによる誤差が除去される）。以上の処理と計算を行いながら、試料台を横方向に一定速度で動かすことにより、試料の粗さ曲線が測定できる。

次に光路差をP点近傍に保ち続けるためのピエゾ素子を用いた干渉計の制御方法を述べる。一般に参照面は試料面に対し傾斜しており、またP点からのずれも持っている。制御によりこれらを補正しなければならない。ピエゾ素子が取るべきこの補正高さ L_i ($i=a, b, c$)は、ピエゾ素子と相似の位置に配置された各光センサのP点からのずれ O_a, O_b, O_c を用いて以下のように計算できる。

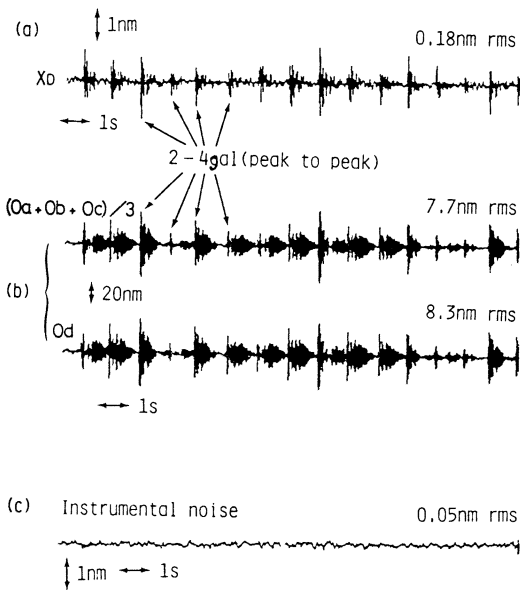


Fig. 5 Noise under the vibrations

(a) data of X_b , (b) data of $(O_a + O_b + O_c)/3$ and O_a . Both (a) and (b) are measured during the vibrations of 2-4 gal by rapping. (c) data of X_b measured during the steady vibrations of 0.4 gal

$$\left. \begin{aligned} L_a &= \frac{1}{2} \left\{ K_0(O_b + O_c - O_a) - \frac{1}{3}(O_a + O_b + O_c) \right\} \\ L_b &= \frac{1}{2} \left\{ K_0(O_c + O_a - O_b) - \frac{1}{3}(O_a + O_b + O_c) \right\} \\ L_c &= \frac{1}{2} \left\{ K_0(O_a + O_b - O_c) - \frac{1}{3}(O_a + O_b + O_c) \right\} \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで各式の最初の括弧で囲んだ項は傾斜を補正するものであり、後の括弧で囲んだ項は平均高さを補正するものである。そして K_0 は、光軸からシリコンフォトディテクタが測定する場所までの距離と、同じく光軸からピエゾ素子の位置までの距離の比により決まる定数である。式(3)により計算された値はすでにピエゾ素子に出力されている値に加算され、そして新しいピエゾ素子への制御値として3-Channel 12 bit D/A変換器を通して出力される。この一連の制御は16 msごとに繰り返され、その結果、参照面は試料面とほぼ平行に、そして光路差はP点近傍に制御され続ける。

3.3 振動の影響の除去性能の測定

干渉像中の中心部と周辺部の光路差の差を取ること、ならびにピエゾ素子による制御、の二つの処理が持つ外部振動の影響の除去効果を調べた。図5は本装置を載せた空気ばね式の除振台を2~4 gal (1 gal = 1 cm/s²)で振動するように手でコン、コンと約1秒間隔で叩いた時の振動の影響の除去効果を調べたものである。雑音信号の低減のため16 msごとの制御の

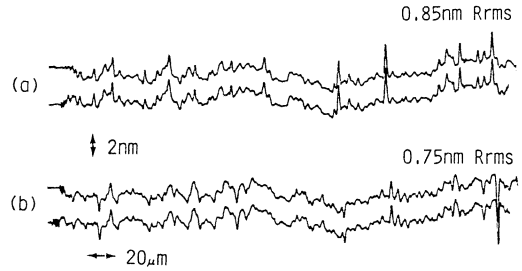


Fig. 6 Double-scan data of an optical flat (a) is under the condition that the interferometer is controlled near the point P. (b) is under the condition that the interferometer is controlled near the point P'

間に各計測を30回連続して行い平均したものであり、試料台を横方向に移動させない状態での X_b 、そして $(O_a + O_b + O_c)/3$ と O_a の信号を示す。(b)の $(O_a + O_b + O_c)/3$ と O_a はピエゾ素子を用いて試料台を制御していても40 nm以上揺らいでいる。しかし、(a)の X_b は差の演算の結果 peak to peak で2.0 nm前後しか揺らいでいない。これが完全にゼロでないのは光センサからの電気信号のサンプルホールドが同時でないこと、ならびに測定点に上下振動と同時に発生している横方向の振動があるためと考えられる。図5(c)は0.4 galでの定常振動状態下での装置雑音のレベルを示しており、rms値で0.05 nmとなっている。なお、通常の機械加工現場での振動加速度強度は1 gal前後であり、防振台を設備するとその上では0.5 gal前後になるようである。

3.4 試料測定結果

次に超精密面の測定を行った。用いたリニアアクチュエータのストローク長ならびにコンピュータのメモリー容量の制限からここでの測定長は短い。しかし、これらはこの方法の測定長に本質的な制限を与えるものではない。測定では試料台を26 μm/sで横方向に移動させており、干渉計の制御は16 ms間隔であり、試料面上での制御間隔は0.4 μmとなっている。干渉光強度の取込みと式(2)の計算は前節の場合と同じく各制御の間に30回行い、それらの値を平均して試料面の形状を求めた。図6は表面の少し汚れているオプティカルフラットの測定結果である。(a)は干渉計を図4のP点近傍に制御して同一箇所を繰返し測定したものである。(b)は干渉計をP'点近傍に制御し(a)の測定場所と同じ所を繰返し測定した結果である。(a),(b)ともに繰返し測定はほぼ同じ信号形状を示すのに、(a)と(b)は大きく異なる部分を含んでいる。この原因は汚れによる試料面の反射率の変動と考えた。なぜなら、測定点の干渉光強度を I 、反

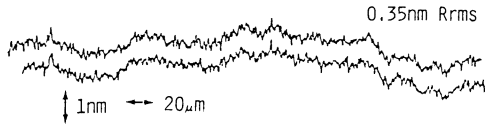


Fig. 7 Double-scan data of an uncoated silicon wafer

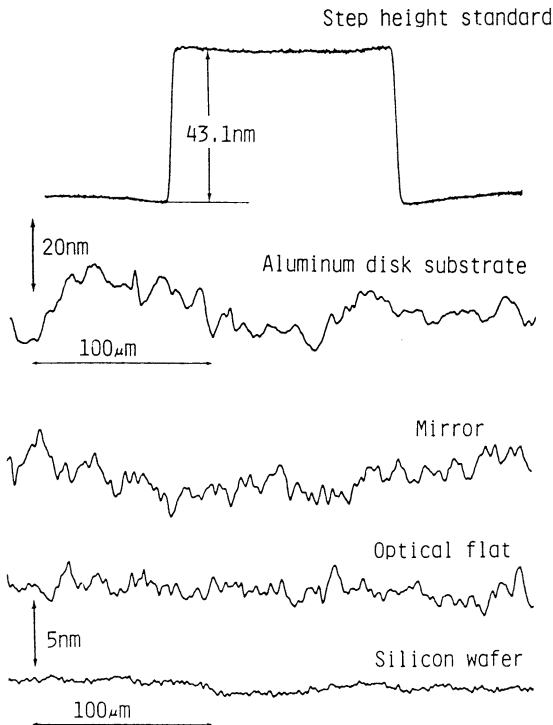


Fig. 8 Measured profiles of some precision products

射率を R 、そして高さを h とすると、P 点では $\partial I/\partial R$ と $\partial I/\partial h$ が符号の異なる値をとるが、P' 点では $\partial I/\partial R$ と $\partial I/\partial h$ は同じ符号を取り、従って光強度信号から高さを求める時、1 次近似において反射率の変化が P 点と P' 点では同じ絶対値を持つ異なる符号の誤差として影響するからである。以上の理由により (a) と (b) の信号を平均したものは、反射率の変動の影響する誤差が打ち消され、正しい粗さ曲線になると考えられる。図 7 にシリコンウエハを繰返し測定した結果を示す。試料面が一樣な反射率を持つ場合の測定であり、本装置が peak to peak で 0.2~0.3 nm の非常に高い繰返し測定精度を持つことを示す。以上の試料以外に、43.1 nm の段差を持つ標準段差試料やコンピュータ用のハードディスクサブストレート（基盤）、そして光学ミラーや表面が清浄なオプティカルフラットの測定を行った。結果を図 8 に示す。図 8 においてミラーはオプティカルフラットに比べて変化の長波長成分の大きいことが簡単に識別できる。なお、これら

の試料の測定時間は 1 測定当たり約 16 s であった。

ところで、この測定方法は周辺部の高さをゼロとする時の測定点の高さを求めているため、得られる曲線は粗さ曲線となっている。このことは標準段差試料の測定結果からも容易に分かる。このカットオフ波長を光センサ A, B, C の間隔から理論的に評価すると約 930 μm であった¹¹⁾。

4. 考 察

測定精度に影響する可能性を持つ誤差要因について考える。①まず、光源の光強度の時間変動があげられる。本装置ではこれは 10% ぐらいであった。しかし、差動法を取っているため測定結果のゼロレベルは一定であり、平均化処理の効果と合わせるとこの変動は大きく見積っても得られた最大粗さの大きさの 10% にしか影響しない。この誤差をより小さくするためには光の強度が一定の光源を用いれば良い。②次に考えられるものに、測定の途中で粗さが大きくなった時に生じる、各シリコンフォトディテクタ A, B, C の Y_{max} , Y_{min} の初期学習値からのずれがある。しかし両者のずれは同じ大きさで互いに異符号なため、P 点の光強度は粗さが大きくなって変動せず、このため大きな影響はない。③干渉像を用いた高精度測定でよく問題になるものに、参照ミラーの粗さの影響がある。通常、参照面以上の加工精度を持つ試料は測定が困難とされる。本手法では、測定は 1 点の高さの連続測定であり、全領域の測定を通じて、光学素子の同じ部分が使用される。このため、参照面の粗さの影響はほとんどない。④しかし、観察面の反射率の変化による測定誤差はこの実験機では 2 回同じ場所を測定して誤差を補正する必要がある（現在、1 回の測定でこの補正を行えるものを開発中である）。

以上のように光干渉法と差動法を組み合わせたオプティカルスキッド法を用いたため、本方法は非接触で超精密加工面の粗さを高精度に測定できる方法となっている。

5. 結 言

上下振動のある環境下においても長い測定域にわたって超精密面の高精度評価を行える、新しい粗さ測定法（オプティカルスキッド法）を提案し、その実験結果について述べた。結果をまとめると以下になる。

- (1) 上下振動が与える誤差を少なくとも 1/20 倍に低減する機能を持つことが確認できた。実験機の装置雑音は 0.4 gal の定常振動下において 0.05 nm rms である。これは触針ならびに光を用いて

の現時点の最高感度測定器の雑音強度とほぼ同じレベルである⁹⁾。

- (2) 参照ミラーの粗さ以下の測定面の測定が可能である。実際にミラー面やオプティカルフラット面、さらにはシリコンウエハ面の粗さを高精度に評価できた。
- (3) 測定長に原理的な制限はない。実験機の測定長は用いたリニアアクチュエータのストローク長とコンピュータのメモリー容量で制限されるのみである。

参 考 文 献

- 1) J. M. Bennett, J. J. Shaffer, Y. Shibano and Y. Namba : Float Polishing of Optical Materials, Appl. Opt., 4, 26, (1987) 696.
- 2) 安達正明, 八坂勝彦 : シャーリング干渉顕微鏡を用いた超精密加工面の RMS 粗さと自己相関関数の測定, 精密工学会誌, 53, 1 (1987) 65.
- 3) S. N. Jabr : Surface-roughness Measurement by Digital Processing of Nomarski Phase-contrast Images, Opt.

- Let., 10, 11, (1985) 526.
- 4) F. Laeri and T. C. Strand : Angstrom Resolution Optical Profilometry for Microscopic Objects, Appl. Opt., 26, 11, (1987) 2245.
- 5) 松賀機器(株)販売「TOPO 3 D」. 論文は例えば, B. Bhushan, J. C. Wyant and C. L. Koliopoulos : Measurement of Surface Topography of Magnetic Tapes by Mirau Interferometry, Appl. Opt., 24, 10, (1985) 1489.
- 6) キヤノン販売(株)「ZYGO 5500」. 論文は G. E. Sommargren : Optical Heterodyne Profilometry, Appl. Opt., 20, 4, (1981) 610.
- 7) (株)小坂研究所「非接触微細形状測定器」. 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.
- 8) (株)東京精密「サーフコム 920 A」.
- 9) 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.
- 10) M. Adachi, H. Miki, Y. Nakai and I. Kawaguchi : Optical Precision Profilometer using the Differential Method, Opt. Lett., 12, 10, (1987) 792.
- 11) 安達正明, 中井康秀, 三木秀司, 川口 格 : 光干渉顕微鏡を用いた除振型表面粗さ計の開発 (第2報), 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1987) 227.



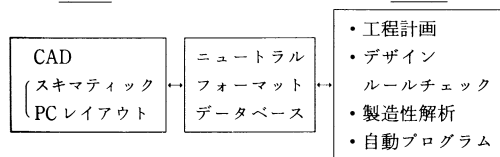
(p.133より続く)

また設計開発面では、メカCAD、論理設計、レイアウト、シミュレーションなどは他社のソフトを使用し、DES net で接続し、どの工場からでもアクセスできるようにしている。これにより設計期間を4~6か月から1週間へと大幅に短縮化している。

DECではCIMへのアプローチとして、最初は自動化に専念していたが、個々の自動化に取り組むうちに複雑になりすぎてしまったという反省から単純化、分析、自動化の三つの要素をアプローチの手段にし、それらを満足するシステムの構築を目指した。これを支えているのがデータマネジメントとネットワークシステムで、これらのシステムを開発・運用する人材の教育も重要視している。

測定機器・コンピュータメーカーであるヒューレット・パッカド (HP) のレイクスティブンス工場は高周波測定機器を作っている典型的な多品種少量生産工場である。

HPのニュートラル・フォーマット・データベース
設計 製造



主要製品は31機種で、機種当たりの月間生産台数は20~300台である。2ラインで混流生産をフレキシブルに行っている。

CIMをコンピュータ・インフォメーション・マネジメントととらえ、生産システムそのものよりも情報のインテグレーションに焦点を当てているのが特徴である。

日本のTQCによるボトムアップと、全社的CIMコンセプトに基づくトップダウン手法をうまく結合した取り組みを行っている。

“モノ”と“情報”の待ち時間短縮、管理の単純化、サイクルタイムの短縮、品質向上がねらいで、CIM導入により85年に45日であった工期を88年には5日に短縮している。

HPのCIM構築手法の中で特徴的なのは、ニュートラル・フォーマット・データベースというデータベースシステムである。設計、製造のいずれに対しても中立的、共通的に位置付けられ、設計情報も速やかに製造へ流すことを目的としている。リレーショナルデータベースとして、設計部門、製造部門が独立的にアクセスでき、相互の情報移転もスムーズに行われる。

CIM化成功の要因として、HPでは①全階層の協力、②技術を目標ではなく道具として認識すること、③優秀な技術者の存在、④理解と単純化——などを挙げている。(以下省略) (服部 敏夫)