

# 高精度多機能干渉計 AMOS-1

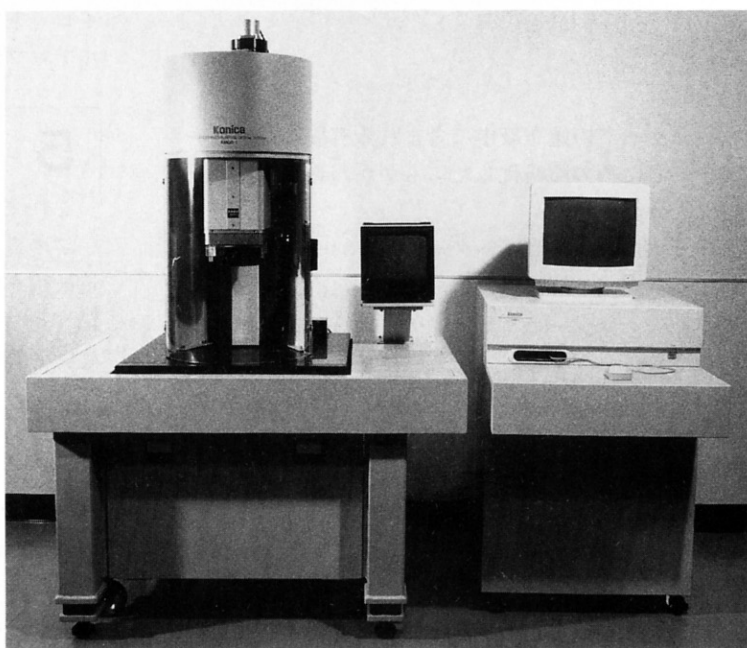
## Advanced Multi-purpose Optical System AMOS-1

細江 秀

吉田 尚

荒井則一

オプト事業部光学開発センター



### Abstract:

KONICA has developed a new multi-purpose interferometer, AMOS-1.

The purpose of the development is to realize very precise and absolute measurement and easy analysis of fine optical devices.

AMOS-1 is composed of the interferometric system (fizeau interferometer), the displacement measurement system (ALIS-1) and the positioning system. These systems are controlled and processed by one personal computer.

The systems made the interferometric measurement easy, automatic, absolute and highly precise.

AMOS-1 is able to measure the absolute radius of surface curvature less than 5 ppm within 1 minute automatically and also other absolute optical values accurately.

The measurement system can be connected to machining process systematically.

Hosoe, Shigeru

Yoshida, Takashi

Arai, Norikazu

Optics R&D Center

Optics Division

# 1

## はじめに

最近では、光学素子の加工技術が $0.1\mu\text{m}$ の形状精度を越える事が当然となり、測定・評価技術に対しても同等以上の高精度化が要求されている。

加工技術と測定・評価技術が表裏一体である事を考えればこれは当然の事であるが、それぞれの要求精度が高くなるにつれて、単なる個々の高精度化だけでは不十分で両者の一貫したコンセプトによる結合が重要になってくる。即ち、加工技術が高精度化するにつれ、外乱・内乱による影響も相対的に大きくなるため、測定された加工誤差を補償しながら加工を行うといった、加工工程とその測定・評価工程のシステム化が必要となってくるからである。

従って、光学面の形状計測においても単に測定・評価を高精度に行えるだけでなく、加工工程にフィードバックし易い形で測定情報を出力する事が重要となる。

加工工程にフィードバックし易い測定値とは、加工系と測定系に共通した基準により求められた測定値、即ち、絶対値であろう。

そこで、光学面の形状測定・評価用として広く用いられている干渉計について、このような観点から見直すと、現状では必ずしも十分に満足できるものではない事がわかる。

例えば球面形状の測定においては、ニュートンリングのような干渉縞を利用する方法が広く行なわれているが、

この方法は、原器（参照面）に対する相対的な測定であり、絶対測定ではない。つまり、球面形状の測定結果として従来の干渉計から出力される値は、単に真球度を表すものであって絶対的な形状を表すものではない。

また、従来の干渉計は平面性や球面性といった縦方向（光軸方向）の測定において、レーザー光の波長を基準とした光波干渉を用いるため、その干渉縞解析により $10\text{nm}$ 以下の測定精度を簡単に得られる。しかし、その横方向（光軸に垂直方向）の精度についてはほとんど考慮されていないため、横方向に歪んだ干渉像をもとに高精度に縦方向の計測を行うという、測定の基本的な考え方に問題がみられる。

ここでは、このような従来の干渉計が持つ問題点を解決する新しいコンセプトを導入し、絶対測定値を加工工

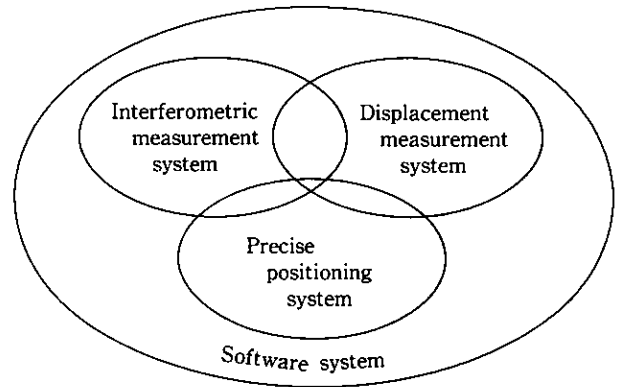


Fig. 1 AMOS-1 system concept

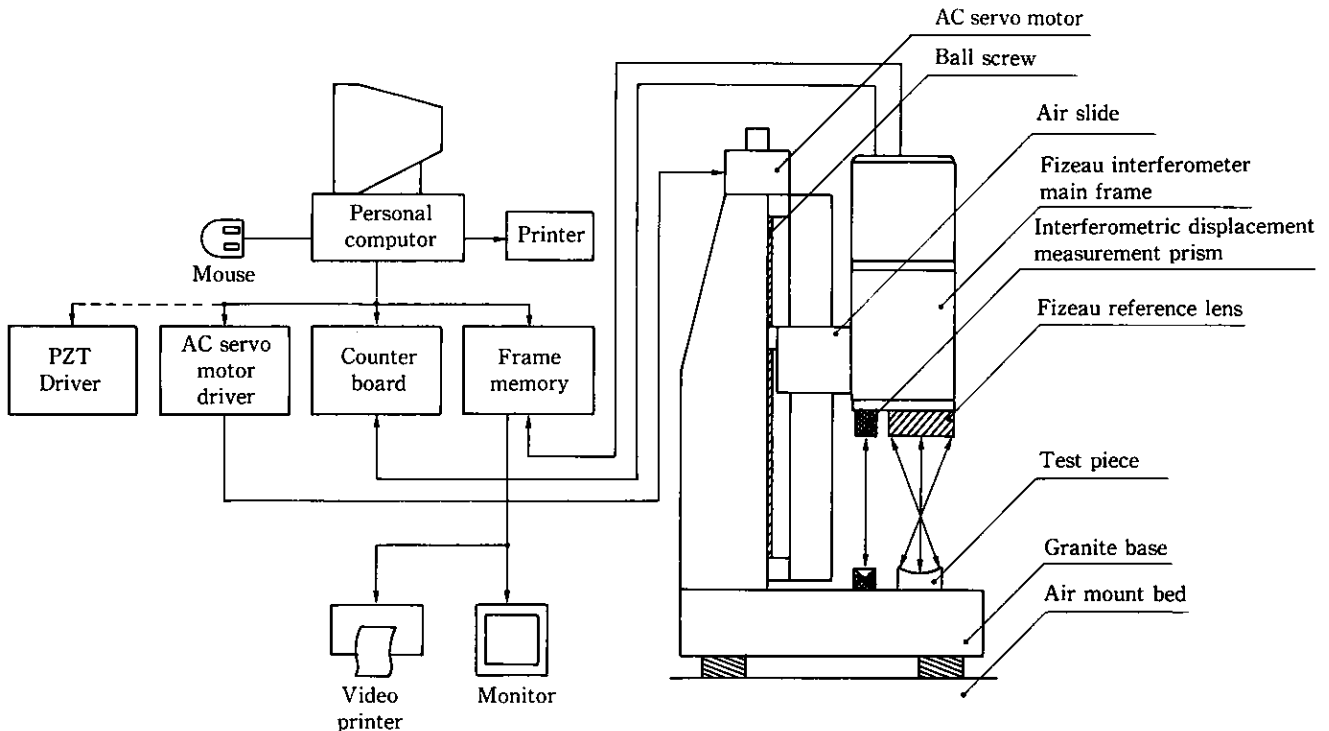


Fig. 2 AMOS-1 system schema

程にフィードバックする高精度多機能干渉計AMOS-1について紹介する。

## 2

### 基本設計思想

AMOS-1の基本設計思想をFig.1に、全体の概要図をFig.2に示す。AMOS-1は、従来の単なる干渉計とは異なり、干渉測定システム、測長システム、精密位置決めシステムの3つの基本となるハードウェアシステムにより構成されており、これらを一貫して統合するソフトウェアシステムにより、統括・制御されている。3つのハードウェアシステムは、個々の機能・性能において世界最高の仕様を満足しているが、さらにこれらを一つのシステムとして統合した事により、従来例をみない極めて多機能な干渉計が実現した。即ち、光学面の曲率半径をはじめとしたTable 1に示される多くの物理量や解析値を高精度に絶対値として自動測定する事が可能となった。

## 3

### 技術的特徴及び仕様

AMOS-1の技術的な特徴と仕様について以下に述べる。

#### 3.1 レイアウト

##### (1)縦型配置

AMOS-1は、Fig.2に示した様に干渉計光軸が鉛直方向の縦型配置となっている。これにより、以下のメリットを有する。

- I)被験物の固定が容易 被験物は置くだけで良く、異形状の被験物も容易に固定できる。
- II)測定基準面の明確化 エアスライド及び干渉計光軸、測長光軸は、グラナイト定盤に対し $90^\circ \pm 10$ 秒以下の

Table 1 Items of measurements

- |   |
|---|
| 1. Radius of optical surface curvature (Automatic measurement)  |
| 2. Figure error of a spherical surface (Fringe scanning method using laser interferometer for distance measurement: ALIS-1)                 |
| 3. Figure error of a spherical surface (Fringe scanning method using piezo electric transducer: FSU option)                                 |
| 4. High precision figure error measurement of a spherical surface (Three sphere test)   |
| 5. Contouring aspherical surfaces   |
| 6. Wave front aberration of a optical unit  |
| 7. Fringe analysis (Polynomial fitting using zernike circle polynomials, point spread function, OTF, Spot diagram and traverse aberrations) |
| 8. Refractive index of a optical parts  |
| 9. Axial distance between two elements in a combination lens  |
| 10. Decentering of each element in a combination lens   |
| 11. Evaluation of a corner cube   |
| 12. Surface roughness   |
| 13. Others (Many items will be added by using auxiliary equipments)   |

垂直度で固定されている。この面を基準として、例えばレンズ面の鏡枠に対する偏心量等を測定する事ができる。

##### (2)干渉計本体の駆動・位置決め

被験物と干渉計本体の相互距離を決める方法として、AMOS-1は、被験物側を固定し干渉計本体をエアスライドとACサーボモーターにより駆動する方法を採用した。これにより以下の効果を得る事ができた。

I)被験物重量に依存しない測定精度 被験物は、重量にして0.1g程のプラスチックレンズから、16Kgを越える金型まで多種多様である。例えば被験物側をエアスライドで駆動した場合、縦型配置のためスライドにモーメントがかかり、重量が大きい被験物では光軸に対して約5秒近くティルトが発生する。一方、AMOS-1の様に、常に一定重量の干渉計を駆動して被験物との相互位置決めを行うレイアウトでは、ティルトの発生は常に一定量で、測定精度に影響を与えない。

II)測定の高速度 AMOS-1ではフリンジスキヤンを通常このエアスライドの駆動により行うが、駆動時の静止特性も被験物によらず一定となるため、マージンを見込む必要がなく高速化できた。この時の微動量は、レーザー干渉測長器による、高精度な実測値を用いている。

##### (3)干渉測定光軸と測長光軸のコモンパス化

干渉測定光束の光軸と、内蔵されたレーザー干渉測長器の測長光軸は、10秒以下の精度で平行(COSエラー $\approx 10^{-9}$ )かつ同一向きに保持され、しかもそれぞれの測定光路長がほぼ同じになるように配置されている。さらに干渉計と測長器の光源は共用化されているから、例えば空気のゆらぎや気圧変化により空気中のレーザー光の波長が変化しても、干渉光束と測長光束に対し同じ様に影響するため、干渉計測値と測長計測値が波長変化の影響を相対的にほとんど受けないという、すぐれた効果を生み出す。

##### (4)測定雰囲気との分離

光学系は被験物も含めて全てカバーで覆い、空気の擾乱を防ぐ構造となっている。

##### (5)外部振動との分離

光学及び機械駆動系の全てを、ダンピング特性を最適化した専用の空気バネ式除振台上に設置して、床振動を測定系から分離している。干渉計本体の高剛性化と相まって、AMOS-1の設置場所を特殊化しないという効果を持つ。

#### 3.2 フィゾー干渉計本体

干渉計本体の仕様を他社との比較においてTable 2に示す。AMOS-1は、以下の(1)~(3)の光学的な工夫の結果、歪が少なくvisibilityの高い干渉像が得られ、(4)~(6)の機械設計上の工夫により、振動や熱的な外乱に対して非常に安定したフィゾー干渉計となった。

Table 2 Summary of specifications of fizeau interferometers  
(Fringe scanning type)

Item	Brand and model	KONICA AMOS-I	ZYGO MARK IV	WYKO-6000
Phase resolution		$\lambda/1024$	$\lambda/1024$	$\lambda/1024$
Spatial resolution		256×240	210×280	256×256 100×100
Repeatability		$< \lambda/100p-v$ $< \lambda/1000rms$	$\lambda/100p-v$ $\lambda/1000rms$	$\lambda/200rms$
Magnification		×1, ×1.4, ×2 ×2.8, ×4, ×5.6 ×8	×1~×6 (ZOOM)	×1~×6 (ZOOM)
Aperture		$\phi 102mm$	$\phi 102mm$	$\phi 150mm$
Aperture of fizeau lens		$\phi 102mm$ ( $\leq \phi 150mm$ )	$\phi 102mm, \phi 150mm$	$\phi 150mm, \phi 102mm$
Accuracy of reference surface	Flat	$\lambda/20p-v$	$\lambda/20p-v$	$\lambda/20p-v$
	Sphere	$\lambda/15p-v$	$\lambda/10p-v$	$\lambda/10p-v$
Data acquisition time		0.2~2sec	167msec	15~75msec
Method of phase measurement		Phase stepping Phase shifting	Phase shifting	Phase shifting
Dimensions (W×D×H)		553×217×161 (mm)	800×534×203 (mm)	782×603×257 (mm)
Weight		18kg	33.5kg	56.3kg
Computer		Personal computer	EWS	EWS

#### (1)干渉像の低歪み化

以下の手段により、横方向精度の低下や干渉縞解析時の誤差を生じさせる干渉像のひずみを低減した。

- I)各光学系の正弦条件誤差量を全て0.1%以下に設計。
- II)投影光学系に固定焦点レンズを使用 投影光学系に、歪曲収差が大きくなり易く、投影倍率を精度良く検出しにくいズームレンズの使用を避け、投影倍率が正確に $\sqrt{2}$ の等比級数となる6本の固定焦点レンズを採用した。
- III)CCDカメラの採用 (撮像系の歪曲が無い)

#### (2)ゴースト光の低減

干渉縞解析において、誤差要因となるゴースト光を以下の手段によってほぼ完全に除去した。

- I)光学設計段階における徹底したゴーストシュミレーションの実施。
- II)高品位反射防止コートの採用。(1面当りR<0.1%)

#### (3)干渉像の微細化

横分解能の向上を生かした微細な干渉像の測定・評価を可能にするため、光学ローパスフィルターを通した投影像を撮像する従来の間接投影光学系を用いず、直接CCD上に干渉像を結像させる方式を採用した。

#### (4)高剛性化

以下の手段により、干渉計の固有振動数を高くして、振動し難く、例え振動しても短時間で減衰させる構造と

した。

これにより、干渉像が測定中に外部振動等によってゆらぎ難くなり、測定の再現性が向上した。

- I)本体構造材として、鋳鉄合金とステンレス材のみを用い、従来一般的なAl合金を全く使用していない。
- II)本体剛体に、膜振動の要因となる板状構造を避け、曲げに対して頑強なフレーム構造を採用した。

#### (5)熱に対する高安定度

- I)低線膨張材( $\alpha = 2 \times 10^{-6}$ )を本体フレーム部品及び光学素子保持部品に使用し、レーザー発振管の発熱や気温の変化による干渉計内部の光路長や機械寸法の変動を小さくして、測定中の干渉縞のドリフトを低減した。

#### (6)小型・軽量化

干渉計本体は、エアスライドに設置するためと高剛性化のために、本体単体重量で他社の1/2~1/3、体積は1/5以下となっている。

- I)口径4 inchコリメーターレンズの明るさを、従来のF5.6~8からF2.0にして、全長を300mm程短縮した。
- II)投影光学系の全長を、ダブリズムにより従来の1/4にした。

### 3.3 レーザー干渉測長器 (ALIS-1)

位置決め絶対基準としてAMOS-1に内蔵されるレーザー干渉測長器でALIS-1と呼ばれている。ALIS-1の仕

Table 3 ALIS-1 Specification

1	Measurement type	Fringe-count
2	Measurement resolution	0.6nm/1LSB
3	Following speed	>1000mm/sec
4	Counting speed	13MHz
5	$\lambda$ compensation value throughput	4MHz
6	Interferometer type	Differential double pass plane mirror
7	Detecting method	Polarizing 3 phase detector
8	Light source	Single stabilized He-Ne laser
9	Linearity	$\leq 1$ LSB
10	Stability	$< 10^{-8}$ /day
11	Size of main interferometer size of detector head	50×45×22mm 35.5×47.5×14mm

様をTable 3に、その光学的なレイアウトをFig.3に示す。ALIS-1は、従来よりも高精度・高安定度・高追従速度を達成するために、光学系や回路全てにわたって簡素化し、誤差要因を少なくする事を基本コンセプトとして開発した。その結果、測長分解能が0.6nmという世界最高レベルを達成すると共に、追従速度も高速化できた。さらに、従来より光学系を1/2程度に小型化でき、測長安定度も向上した。勿論、ALIS-1単独での使用も可能である。

(1)高分解能化

以下の手段により、使用波長の1/1024の分解能 (0.6 nm) を安定して得た。

- I) ダブルパス干渉方式による、光学的な高分解能化。
- II) 干渉縞の位相を直接デジタル演算する新しい高分解能内挿回路を開発した。

(2)高安定化

- I) 不要な光路の引き回しを最小限にした新しい差動型光学系の開発により、温度等によるドリフトを低減した。
- II) 干渉縞の偏光位相分解による、差動型検出光学系を採用した。

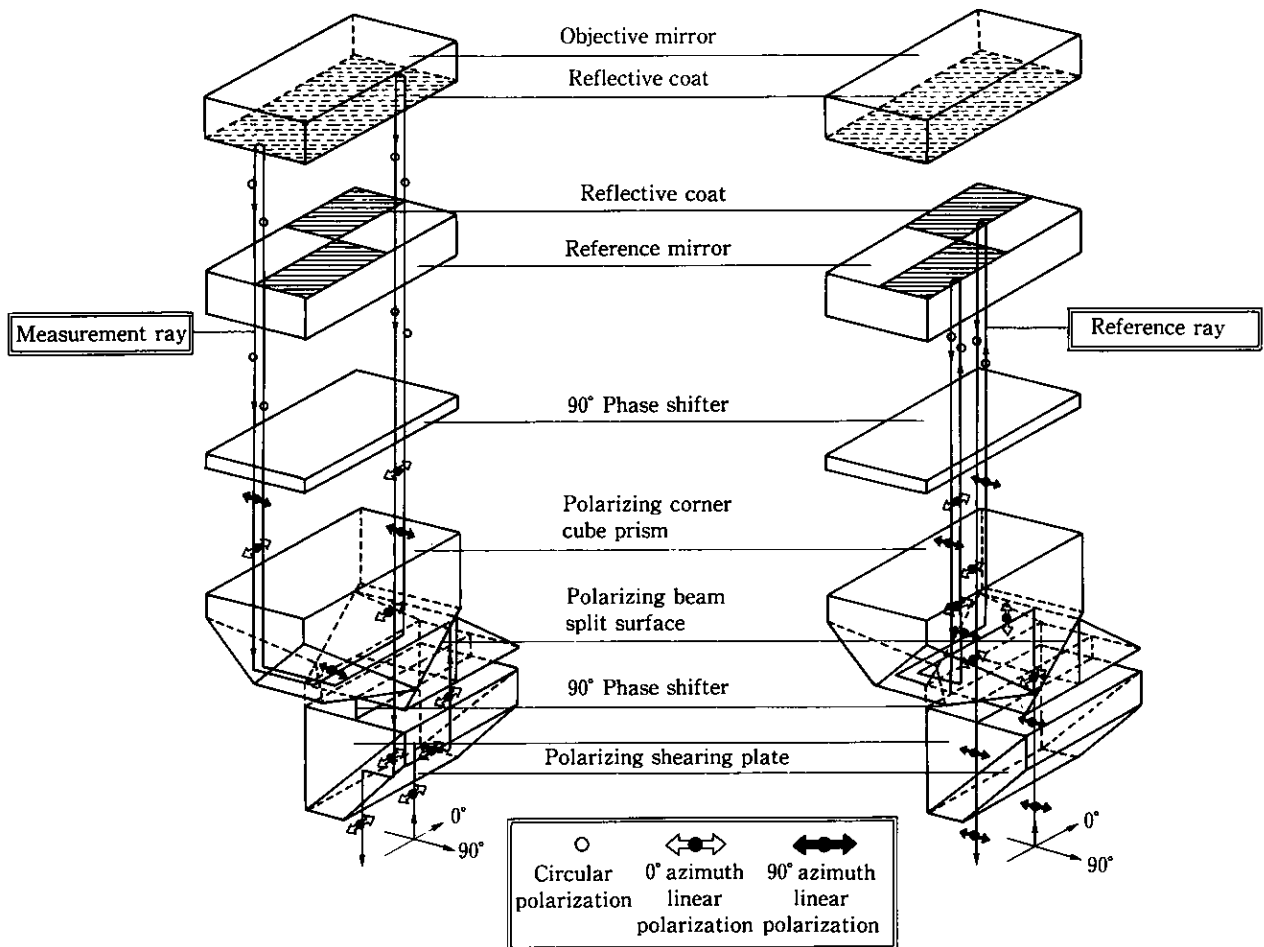


Fig.3 ALIS-1 Optical layout of interferometer

Ⅲ) 光ファイバーを用いた光学的な伝送により、検出信号を低ノイズ化した。

Ⅳ) 光学系の保持部材に、全て低線膨張材 ( $\alpha = 2 \times 10^{-6}$ ) を使用し、温度変化による光学素子の移動を低減した。

(3)高直線性

Fig.4に干渉縞強度による測長信号を、最終的なカウント用の2相信号 ( $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$ ) に変換した時のリサージュ図を示す。以下の手段により、この様に真円度の良い、即ち測長値の直線性誤差が1 LSB (0.6nm) 以下の測長を実現した。

I) 光軸方向の位相調整機構を持つ、新しい偏光検出光学系の開発により、測長信号中の一次周期誤差を完全に除去した。

(4)高追従速度

以下の手段により、追従速度を高速化した。

I) 干渉縞計数方式の採用による、計数回路の簡素・高速化。

II) 演算メモリーを用いた直接位相算出方式による計数回路の高速化。

(5)小型・軽量化

測長干渉計内の、測長に不要な光路の引回しをなくしたため、差動型でありながら光学系の小型・軽量化を実現できた。

3.4 精密位置決め機構

このシステムは、セラミック製の剛性の高いエアスライドを、ACサーボモーターとボールスクリュウにより10nmの分解能で駆動・位置決めを行うものである。エアスライドの仕様をTable 4に、その特性をFig.5~7に示す。

このシステムは、AMOS-1の中でも機械精度が最も高い所だけに、開発に一年近くを要した。

(1)真直度

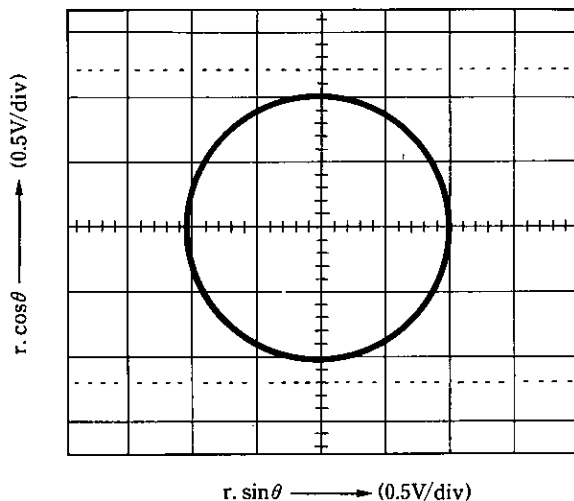


Fig.4 Final measurement signal of ALIS-1

スライドの真直度をFig.5に示す。500mmのストロークに対して、X方向・Y方向共1 $\mu$ m以下の真直度である。

(2)高剛性化

多孔質グラファイトパッドを用い、Fig.6(a), (b)に示すように、2~3 $\mu$ mという非常にわずかな浮上量により、剛性値をオリフスタイプの3倍ほどに高めた。

(3)無振動化

多孔質グラファイトパッドにより、エアフィルムの圧力分布が均一化されエアのダンピングを良く押さえるため、微細な振動を実用上問題ないレベルまで低減できた。

(4)高安定化

機械精度の熱的・経時的な安定化のために、スライド及びレールの素材にアルミナ系セラミックを用いた。

(5)高分解能

ACサーボモーターにより、スライドを10nmの位置決め分解能で制御する。Fig.7にそのセミクロズドループにおける10nmステップ送りの結果を示す。

3.5 統括・制御ソフトウェア

ソフトウェアシステムの特徴をTable 5に示す。合計30,000行を越えるC言語のプログラムは、市販の干渉縞解析を全て網羅しており、解析結果をよりわかり易く表示して

Table 4 Precise positioning system specification

1	Slide length	500mm
2	Material	Almina ceramic
3	Stiffness X direction	100kgf/ $\mu$ m
4	Y direction	80kgf/ $\mu$ m
5	Straightness X direction	0.39 $\mu$ m/500mm
6	Y direction	0.84 $\mu$ m/500mm
7	Slide vibration servo motor OFF	$\leq 10$ nmp-p
8	servo motor ON	$\leq 10$ nmp-p
9	Positioning precision (open loop)	$\pm 20$ nm
10	Maximum speed	5mm/sec
11	Supply air pressure	4atm
12	Air consumption	5 Nl/min

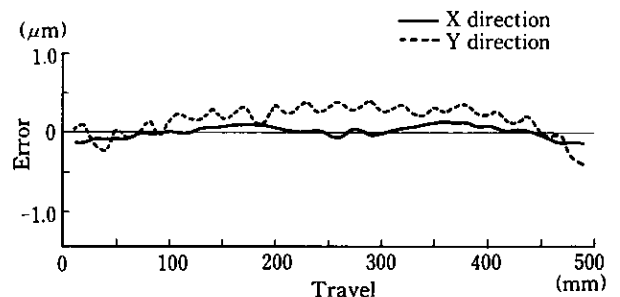


Fig.5 Straightness of air slide

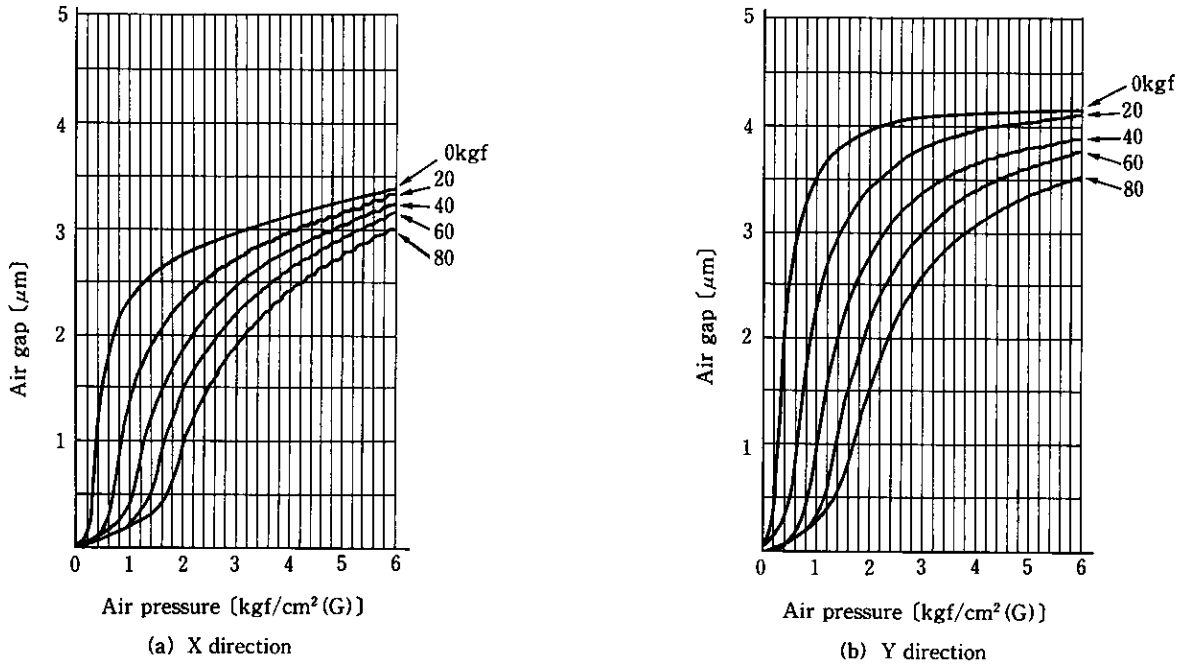


Fig. 6 Stiffness of air slide

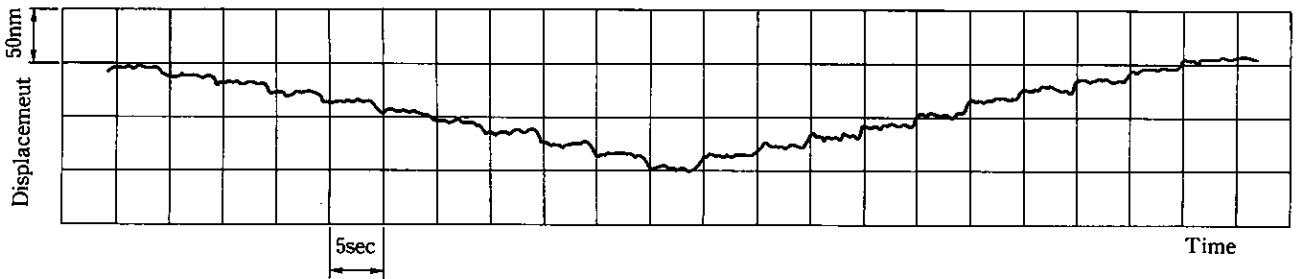


Fig. 7 10nm Jog (10 steps: semi-closed loop)

Table 5 Software feature

High speed response	
①	Loaded special co-processor
②	Optimized I/O control
③	Optimized graphic routine
④	Improved FFT routine
Friendly operation	
①	Menu system
②	Perfect mouse selection
③	Unified operation
④	Self-diagnostic system

いる。Fig.8にその例として、干渉縞から波面収差を算出し、それを3次元表示した例を示す。このようにコストの観点からあえてハードウェアとしてパーソナルコンピュータを採用しながら、その能力を極限まで発揮させることで十分な機能を実現した。

干渉縞解析も軸動作も全て、同一のパーソナルコンピュータ上でマウスにより行なわれる。

### 3.6 フリンジスキャンユニット (FSU: オプション)

これは、干渉計本体を単独で使用する際に、オプションとして使用されるユニットである。Fig.9に示すように干渉計本体とフィゾー参照レンズの間に取り付け、フリンジスキャンを行う。

このユニットの重要な点は、参照レンズを光軸方向に高精度に平行微動させる事である。そのために以下の手段を用いた。

- I) 平行弾性バネの採用 従来方法と異なり、ユニットに平行弾性バネを採用し、微動の際の平行度を全てこの機械部品に負わせる事で、PZT素子の負荷を

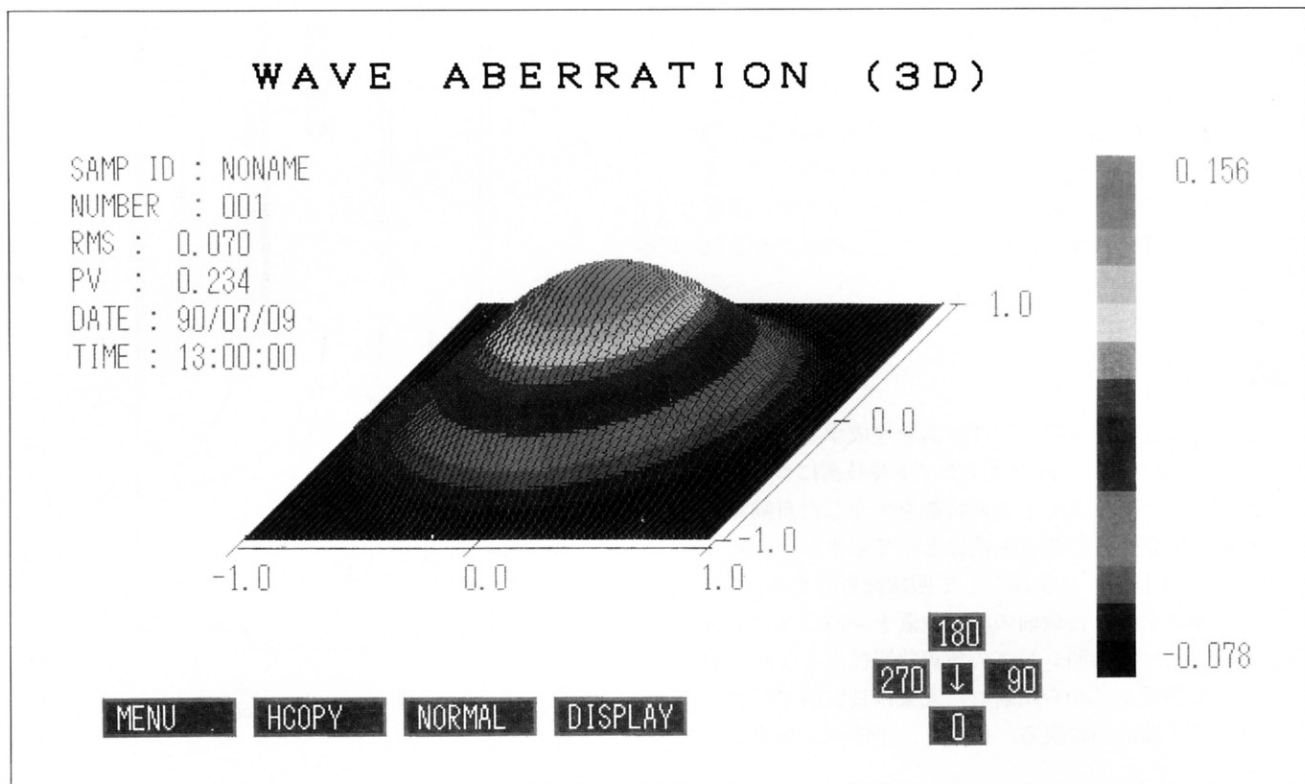


Fig.8 Display sample of fringe analysis

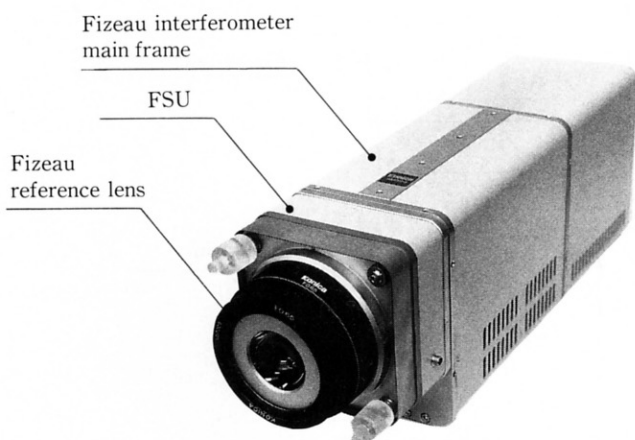


Fig.9 FSU Option unit

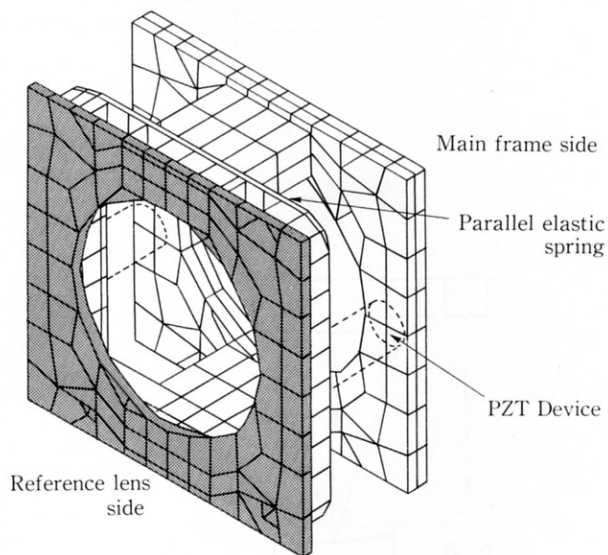


Fig.10 FEM Analysis of FSU

Table 6 Fizeau reference lens specification

1	Focal length	66.3mm
2	F No.	0.65
3	Back focus	36mm
4	Entrance pupil	$\phi 102\text{mm}$
5	Total axial length	47.4mm
6	Elements	4
7	Sine condition error	<0.1%
8	Reference surface accuracy	< $\lambda/15$
9	Reference surface reflectance	4%

軽くした。この結果、簡単な構造により高剛性の微動を実現できた。PZT素子も、特性をそろえる必要がなくなり、市販の安価なものを使用できる様になった。

II) 有限要素法を用いた最適化 設計にあたっては、Fig.10 に示す様に平行弾性バネの最適化を有限要素法を用いて行い、微動に伴う応力やひずみの局在が最小となる形状にまとめられている。微動の平行度は、使



用範囲において0.05秒以下である。

### 3.7 フィゾー参照レンズ

このレンズは、フィゾー干渉計において要となるレンズであるため、新たに開発を行った。仕様をTable 6に、概要をFig.11に示す。他の光学系と同様、正弦条件やゴースト光の処理に十分な配慮がなされており、加えて、温度変化に対する光路長変化についても十分な吟味がなされている。

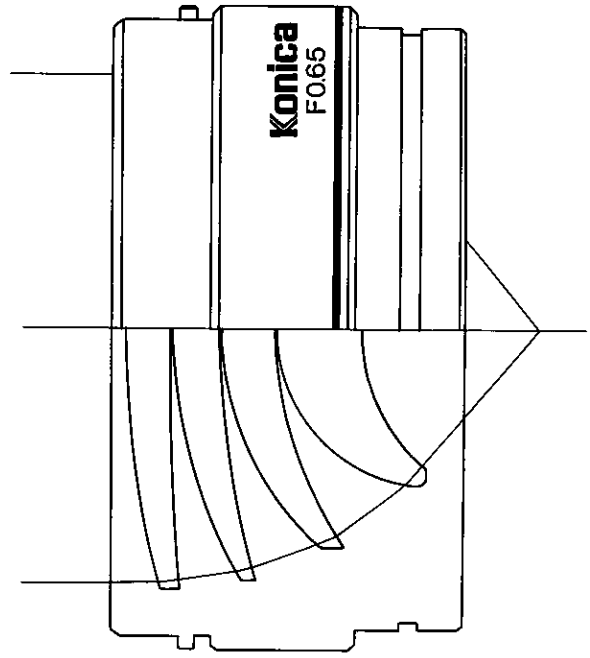


Fig. 11 Fizeau reference lens

## 4

### 測定原理

以上、高精度に絶対値の干渉計測を達成するために、AMOS-1に取り入れられたコンセプトや技術について紹介したが、ここではAMOS-1の特徴を生かした自動測定の実理を、曲率半径の測定を例にとって示す。

Fig.12に示す様に、被験面として凹球面を考える。最初に干渉計本体と被験面の相互位置を(a)のように被験面が頂度フィゾー参照レンズの焦点位置にくるように配すると、参照レンズから出射した光束は被験面で反射・折り返して干渉計内に戻る。従って、干渉縞が観察でき

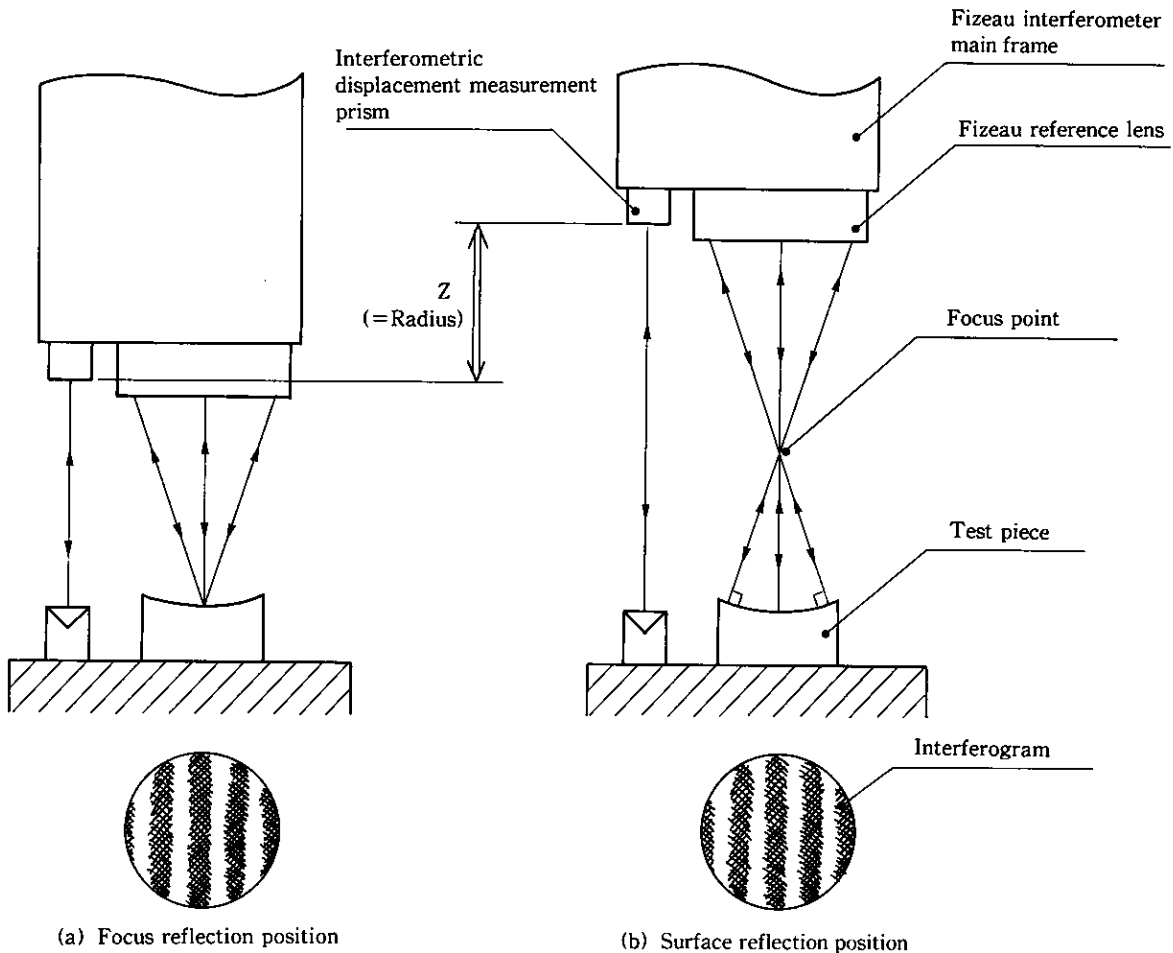


Fig. 12 Principle of surface radius measurement

るので、その直線性からこの近傍において最も焦点に近いと思われる位置を、高精度に決定する。この位置は頂点反射位置と呼ばれる。次にエアスライドを駆動し、干渉計本体を被験面から離していくと、参照レンズからの出射光が被験面に対し、丁度垂直に入射・反射して、元の光路をたどり干渉計内に戻る位置がある。この近傍で頂点反射位置と同様に、干渉縞の直線性から高精度にこの位置を特定する。(b)に示したこの位置は、面反射位置とよばれるが、図から明らかのように2つの位置の距離Zが、即ちこの凹球面の曲率半径として測定される訳である。AMOS-1ではこの作業を全て自動で行えるように設計されている。

次に、上述の各反射位置を精密に自動査定する原理をFig.13によって示す。査定に用いた干渉縞の直線性とは、被験面からの戻り光が理想の波面にどの程度近いかを示すものであるから、逆に波面収差(波面の悪さ加減)が最小となる位置を各反射位置と考える事ができる。従ってFig.13のように各反射位置近傍で少しずつ距離を変えながら、波面収差を干渉パターンよりサンプリングした後、最もらしい近似曲線を求め、その極致をとる位置を、各反射位置として査定することができる。サンプリング点数は10個もあれば十分で、自動測定により1分足らずで高精度に各反射位置を決定できる。

このようにしてAMOS-1によって求められた曲率半径の値は、被験物のN. A. が大きい場合には有効数字が6桁にも及び、極めて高精度に個人差なく得る事ができる。

ちなみに、JIS B-7433ニュートンゲージに記されている最も高精度な校正用ゲージにおいても、曲率半径の相対誤差は20ppm以下と規定されており、AMOS-1の測定精度は曲率半径の原器として十分使用できる事がわかる。

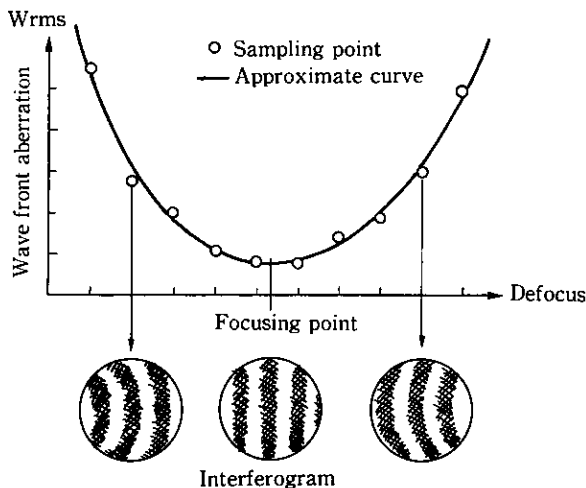


Fig. 13 Principle of auto focusing

このようにAMOS-1は、高精度に絶対形状として球面を特定できるため、従来は捉えられなかった研磨加工中のレンズの微小な形状変化の挙動や、個々の単レンズの絶対形状の測定値から、組立て後の性能を忠実にシミュレーションするといったことが実際にできる様になったのである。

## 5

## むすび

AMOS-1は、その構成要素一つ一つの技術的な内容が多岐にわたるため、ここでは単なる概要の紹介にとどまったが、干渉計の高精度化と測長・位置決め機能の付加により、超精密加工と密着した数多くの測定・評価のアプリケーションが考えられる。現在使用頻度の高いものから、順次自動測定化を進めている。

AMOS-1に関する特許は20件を越えているが、その中で純粋に光学的なものは、半数に満たない。

今後干渉計は、従来の様なオプティックスを主体とする製品としてではなく、メカニクスや制御エレクトロニクスと結びつき、より能動的な測定・評価の方向へ進むものと考えられる。そしてAMOS-1は、その意味において先鞭をつけた最初の干渉計として、今後位置づけられていくであろう。

最後に、AMOS-1の開発において適切な指導・アドバイスを頂いた、木村凱昭センター長及び桜井GLに感謝の意を表したい。

### ●参考文献

- 1) Canon,ZYGO Mark IV 製品カタログPUB.B-CJ4016B0188SZ 2
- 2) 松下電器産業㈱,WYKO 6000製品カタログ
- 3) 富士写真光機㈱,FUJINON干渉計・編解析システム製品カタログ89.2-MO
- 4) Canon,ZYGO AXIOM2/20製品カタログPUB.B-CJ4237B0789SZ1.5
- 5) Canon,ZYGO AXIOM2/202000シリーズ製品カタログ0390SZ 3
- 6) 松本弘一: "最近のレーザー干渉測長器",計測管理38(7),758-763 (1989)
- 7) L.J.Wnerz,R.C.Quenell: "Laser interferometer system for metrology and machine tool applications"Precision Engineering,5(3),111-114 (1983)
- 8) R.C.Quenelle,L.J.Wnerz: "A New Microcomputer Controlled Laser Dimensional Measurement and Analysis System",Hewlett-Packard Journal,APR. (1983)
- 9) 西村哲治: "レーザーによる微小計測",第26回全日本光学測定機展技術講演資料1-10