研究

光学式非接触プローブの研究*

下河辺 明** 長田 秀治**

An Optical Non-contacting Probe

Akira SHIMOKOHBE and Hideharu OSADA

An optical non-contacting probe for detecting displacement, position and inclination of a work surface is developed. The probe uses two or four light beams, intersecting at an angle at a point near the work surface and making spots on it. Images of the spots are formed on an opto-electronic device by a condensing lens. The position of the spots and the distance between them, and those of the images are depending on the distance between the intersection of the beams and the work surface, and the inclination of it. The position of the images and the distance between them are detected by the optical device and then the output of it is converted into a signal representing the displacement, the position or the inclination of the work surface by an electronic circuit. An experimental

probe is arranged utilizing two beams. Two intersecting angles, 90° and 30° , and two optical devices, a quartered photo dio and a position sensitive detector, are examined. Measurements of three work surfaces, a sandy, a lathed and a ground surface, are carried out. The displacement of three work surfaces is measured successfully. The position and the inclination of the sandy surface are also detected as expected. Some cases of the position and the inclination measurements of the lathed and the ground surface are shown to be difficult because the incident beams on the work surfaces are reflected specularly rather than diffusely and the condensation of the reflected light by the lens becomes inadequate.

Key words: optical probe, non-contacting probe, displacement measurement, position measurement, inclination measurement, two light beams system, opto-electronic device.

1. 緒 言

近年、インプロセス計測、3次元測定機、ロボットなど、多様な分野における非接触プローブ、非接触センサに対する要求はきわめて高く、空気式、超音波式、電気式、光学式などの各種の方法が検討され、また実用されている。従来の光学的方法には、1本の光線を用いる方法¹⁾²⁾、2本の光線を用いる方法³⁾、光ファイバを用いる方法⁴⁾、光波干渉を用いる方法⁵⁾などがある。

本研究では、十分長い作動距離をもち、測定面の変位、位置、傾きの高精度測定が可能な光学式非接触プローブの基礎的問題について検討する。その原理は1本の光線を用いる方式と同様である。ただし、感度の向上を目的として、測定面上又はその近くで交わる2本又は4本の光線を交互に照射し、交互にできる光点の像を受光素子上に作り、像の位置を検出することにより測定面の光線の交点からの変位量を知る方法を考える。光線を複数にすることにより、測定面の変位だけでなく、位置、傾きの検出も可能となっている。

2. 原 理

2.1 測定系の構成

測定の原理は、光線が2本の場合も4本の場合も全く同様であり、図1の2光線の場合について説明する。座標系 $O-xy$ を図のように定め、光線 B_1, B_2 により測定面上に光点 S_1, S_2 を作り、レンズ L により S_1, S_2 の像を受光素子 P 上に作るものとする。

測定面が(1)の位置にあるとき、光点は S_{11}, S_{21} で像は I_{11}, I_{21} にあり、(2)の位置では光点は S で合致し、像も I で一致している。測定面が(3)の位置にあるとき、光点は S_{13}, S_{23} 、像は I_{13}, I_{23} となり、合致点 S 及び I に関する光点及び像の x 軸方向の位置関係は(1)の場合と逆になっている。

Fig. 1 Displacement and position measurement

* 原稿受付 昭和58年9月30日。昭和58年度精機学会春季大会学術講演会(昭和58年3月29日)にて発表。

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

Fig. 2 Light beams and output signals (Displacement and position)

さらに、測定面が点 S 付近で平面とみなすことができれば、測定面の変位と光点の x 座標は比例し、測定面変位があまり大きくなければ像の x 座標も測定面変位に比例すると考えることができる。したがって、像の位置、間隔を受光素子で検出できれば、測定面の変位を知ることができると言える。

しかし、 B_1, B_2 を同時に照射すると、受光素子上の像が B_1 による I_1 であるのか、 B_2 による I_2 であるのかの区別がつかない。すなわち、測定面の位置が (1) か (3) かの判別が不可能となる。そのために、 B_1 と B_2 を交互にオン、オフし、 B_1 がオンのときの像は I_1 、 B_2 がオンのときの像は I_2 と判別できるようにする。4 光線方式とする場合は、図 1 の y 軸を含み、 xy 平面に垂直な平面内に存在し、S で交差する 2 本の光線を追加する。

2.2 変位の測定

測定面は y 軸に垂直な平面とし、受光素子 P として像位置に比例した出力が得られるものを用いるものとする。このとき、 B_1, B_2 のオン、オフと測定面の位置に対応し、P の出力は図 2 のようになる。測定面が (2) の位置のどちら側にあるかにより位相が 180° ずれた矩形波であり、振幅は測定面の (2) の位置からの変位に比例する。この出力矩形波を、例えば B_1 のオン、オフを基準に復調すれば、図 2 の復調器出力、すなわち測定面の変位に比例した直流出力を得ることができる。

2.3 位置の測定

図 2 の (2) の測定面位置では、受光素子及び復調器の出力はともに零である。これを利用して、測定面が (2) の位置にあるかどうかの判別が可能である。この場合は P の線形範囲は狭くてもよい。また測定面は y 軸に垂直でなくとも、また平面でなくとも原理的に問題はない。

2.4 傾きの測定

Fig. 3 Inclination measurement

Fig. 4 Light beams and output signals (Inclination)

図 3 の (1) のように測定面が傾いた場合、 I_{11} と原点 O との距離は I_{21} と O との距離よりも長い。逆に面が (2) のように傾けば距離の関係は逆になる。ただし、(3) のように面が S を通れば像は合致している。図 2 と同様に P と復調器出力を考えると図 4 のようになる。図の破線で示した P の出力の平均値 (直流分) は、測定面の傾きの方向を示している。これを利用して測定面の傾きを知ることができる。

図 5 に示すように、測定面の x 軸に対する傾きを α 、光線の交差角を θ 、測定面と S との y 軸上の距離を δ とする。光点 S_1, S_2 の x 座標 x_{S1}, x_{S2} は

$$x_{S1} = \frac{\delta}{\tan \alpha - \tan\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right)} \quad (1)$$

$$x_{S2} = \frac{\delta}{\tan \alpha + \tan\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right)} \quad (2)$$

ここで次の量 f に注目する。

$$f = \frac{x_{S1} - x_{S2}}{x_{S1} + x_{S2}} \quad (3)$$

上式に式 (1), (2) を代入して整理すると次式を得る。

$$\tan \alpha = f \cdot \tan\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right) \quad (4)$$

Fig. 5 Work surface inclination and f ; $f = (x_{s1} + x_{s2}) / (x_{s1} - x_{s2})$

Fig. 6 Optical setup

これより、式(3)の f を求めることができ、式(4)に代入することができれば、 δ には無関係に測定面の傾き α を定めることができることがわかる。ところで、式(3)の分子 $x_{s1} - x_{s2}$ は図4の復調器出力の平均値(直流分)に比例し、分母 $x_{s1} + x_{s2}$ は受光素子出力の平均値(直流分)に比例する。したがって式(3)の f は容易に求めることができ、 α を決定することができる。

図5(b)は f と α の関係の計算例である。同図(a)の幾何学的関係からも明かなように、 $\alpha = \pm(\pi - \theta)/2$ が測定の限界となっている。

3. 実験

3.1 光学系

本論文では光線を2本とし、図6に示す光学系により実験した。He-Neレーザを光源とし、ミラー M_1, M_2 により平行光線を作る。切欠き付き回転円板のチョップにより光線をオン、オフし、ミラー M_3, M_4 により光線を角 θ で交差させる。レンズ L_1, L_2 により光線の交点付近での径を絞り込む。またレンズ L_3 により測定面での反射光を集光し、像を受光素子上に作る。

光線 B_1, B_2 の平行部分の距離は115 mm、オン、オフの周波数は167 Hzである。交差角 θ は 90° と 30° の2種類である。 $\theta = 90^\circ$ の場合、 L_1, L_2 は $f = 74$ mmの顕

微鏡対物レンズ、 L_3 は $f = 50$ mmのカメラレンズを用いている。 $\theta = 90^\circ$ のため、測定面変位と光点の移動量は等しい。レンズ L_3 と測定面間の距離(作動距離)は約50 mmで、光点の測定面上の移動量は約4倍に拡大され、受光素子上の像の移動量となる。交点付近での光線の強度は、直径10 μm のピンホールとフォトマルによる測定ではかなり矩形分布に近い分布を示し、直径は $1/e$ 値で約140 μm であった。受光素子上での像の直径は約560 μm と推定される。

$\theta = 30^\circ$ の場合、 L_1, L_2 は $f = 50$ mm、 L_3 は $f = 70$ mmのそれぞれ単レンズを用いた。作動距離は約90 mmで、光点の移動量は約3.5倍に拡大されて像の動きとなる。ただし、 $\theta = 30^\circ$ のため測定面変位は約 $1/3.7$ に縮小されて光点の移動量となり、測定面変位と像の移動量は約 $1:0.94$ の割合となっている。交点付近の光線の直径は実測約280 μm 、受光素子上では推測約1 mmである。

3.2 受光素子1(4分割フォトダイオード)

受光素子の一つとして4分割フォトダイオード(Quartered Photodiode, 以後QPDと略記)を用いた。光線が4本の場合は図7(a)の斜線の各区分を独立に使用するが、本論文の実験では2光線のため、図の z 軸を境界に、上下に2分割された素子として使用する。

図7(b)のように半径 r の像がQPD上にあり、中心の x 座標が x_i であるとする。上下の受光部 D_1, D_2 の受光量は、 D_1, D_2 上の像の面積に比例するものとする。 D_1, D_2 上の像面積の差、すなわち D_1, D_2 の受光量の差に注目し、像面積の差を像の全面積 πr^2 で無次元化した関数 $F(x_i/r)$ を考える。図7(c)は $F(x_i/r)$ の計算結果である。像の半径が等しくても、受光部のすきま h によ

Fig. 7 Quartered photodiode (QPD) and its output

り感度が異なること, h がかなり大きい $h/r=0.5$ でも測定は可能なこと, h が大きい程線形範囲は広いこと, などがわかる. 実際には $h=50\text{ }\mu\text{m}$ であり, $r=280\text{ }\mu\text{m}$ の $\theta=90^\circ$ では $h/r=0.18$, $r=500\text{ }\mu\text{m}$ の $\theta=30^\circ$ では $h/r=0.1$ となる. 図7(c)より, QPD出力の飽和する x_i は, $\theta=90^\circ$ 及び 30° に対しは $x_i=\pm r$ であり, これを測定面変位に換算すると $\pm 70\text{ }\mu\text{m}$ ($\theta=90^\circ$) 及び $\pm 500\text{ }\mu\text{m}$ ($\theta=30^\circ$) となる.

3.3 受光素子2(半導体位置検出器)

半導体位置検出器 (Position Sensitive Detector, PSDと略記) は受光面に入射した光の光量と重心位置を出力する. 1次元形と2次元形があるが, 本論文では2光線方式としたので1次元形を用いた. 受光部は $1\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ で, 素子の長手方向の像の重心位置を検出できる.

3.4 測定面

測定面は呼び直径 20 mm の円筒面で次の3種である.

- (1) 粗面 (粒度2000番の研磨紙を円筒に糊付けしたもの) 直径 $d=19.977\text{ mm}$, 軸方向表面粗さ $R_{\max a}=4.0\text{ }\mu\text{m}$, 円周方向表面粗さ $R_{\max c}=4.0\text{ }\mu\text{m}$, 真円度 R_0 : 研磨紙の継ぎ目のため測定不能.
- (2) 旋削面 $d=20.013\text{ mm}$, $R_{\max a}=5.3\text{ }\mu\text{m}$, $R_0=3.5\text{ }\mu\text{m}$.
- (3) 研削面 $d=19.875\text{ mm}$, $R_{\max a}=0.6\text{ }\mu\text{m}$, $R_{\max c}=1.0\text{ }\mu\text{m}$, $R_0=1.6\text{ }\mu\text{m}$.

3.5 測定面変位の測定方法

測定面はクロスライド上に固定し, x, y 方向に移動させる. $\pm 300\text{ }\mu\text{m}$ 以上の移動の場合, 移動量はクロスライドのマイクロメータヘッド ($1\text{ }\mu\text{m}$ 読み) で読み取る. y 軸方向で $\pm 300\text{ }\mu\text{m}$ 以下の場合, 測定円筒の光点と反対側に電気マイクロメータのフィーラを接触させ移動量を測定する. 光学式非接触プローブ側では, 復調器出力電圧などを, ローパスフィルタを通した後にデジタルボルトメータで読み取る.

4. 実験結果

4.1 変位の測定

図8はQPD, $\theta=90^\circ$ の場合である. 以下の図も含め, 図中の測定値は3回の測定の平均である. 図8(a)は $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ を, (b)は $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ を測定した結果で, 線形範囲は約 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$, 出力の飽和する変位は約 $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ であり, 3.2節での議論とほぼ一致する.

測定面の種類により線形部分の傾きが異なるのは次による. 研削面のように入射光が乱反射されにくい面では, レンズ L_3 により集光される光量が減少し, 受光素子の入射光量が減る. その結果, 図2, 4で説明した復調を行

Fig. 8 Displacement measurements ($\theta=90^\circ$, QPD)

Fig. 9 Displacement measurements ($\theta=30^\circ$, QPD)

う割算器の分母入力小さくなり, 零割り状態となる. これを回避するため, 分母入力に常に一定値を加えている. このオフセットの影響は, 受光素子出力の小さい研削面ほど大きく, 図8(b)のような結果となっている.

図9はQPD, $\theta=30^\circ$ の場合である. θ が小さいため, 像が受光部の二つの区分にまたがって存在する測定面の位置範囲が広く (図7(b)), 線形範囲が広い. 出力は変

Fig. 10 Displacement measurements ($\theta=90^\circ$, PSD)

Fig. 11 Displacement measurements ($\theta=30^\circ$, PSD)

位約 $\pm 600 \mu\text{m}$ で飽和し、これも 3.2 節の議論と一致する。

図 10 は PSD, $\theta=90^\circ$, 図 11 は PSD, $\theta=30^\circ$ の場合である。QPD を用いた場合よりも線形範囲は広く、PSD が変位測定に適していることを示している。 $\theta=30^\circ$ では、受光素子への入射光量が十分であったため、前述の割算器分母入力オフセットを零とすることができた。そのため、各測定面に対する線形部分の傾きはほぼ一致した。

QPD, $\theta=30^\circ$ 及び PSD, $\theta=90^\circ$ での研削面の測定は、最大測定範囲での線形性が極端に悪く不可能であった。

Fig. 12 Position measurement ($\theta=90^\circ$, QPD)

同じ交差角でも、他方の受光素子では測定が可能であり、必ずしも受光素子への入射光量だけの問題とは思われず、電子回路も含め今後検討する必要がある。

4.2 位置の測定

位置の測定は円筒形状の測定として行った。すなわち、3.4 節で述べた測定円筒を x 方向の各位置に固定し、 y 方向に移動させる。このときプローブの復調器出力は、円筒の y 方向位置、測定面の傾きにより変化するが、円筒面上で二つの光点が一致したとき、つまり測定面が光線の交点を通るとき零となる。このときの y 座標を読み取り、円筒の形状を定める。

図 12 は QPD, $\theta=90^\circ$ の測定結果である。円筒面の傾き約 $\pm 30^\circ$ まで測定されているが、それ以上は面の傾きにより、一方の光線の反射光がレンズ L_3 により集光されなくなるため測定できなかった。図には測定された円筒形状と、測定点から最小 2 乗法により定めた円と測定点の y 方向の差を示している。図 13 は PSD, $\theta=90^\circ$ 及び $\theta=30^\circ$ の粗面の測定結果である。 $\theta=30^\circ$ では円筒面の傾き約 $\pm 50^\circ$ まで測定できている。

測定点の最小 2 乗円からの差は、QPD の場合で $\pm 5 \mu\text{m}$ 以上、PSD の場合で $\pm 10 \mu\text{m}$ 以上ある。この結果からは位置測定には QPD が適していると言うことができる。最小 2 乗円と測定点との差には、本プローブ自身の誤差のほか、円筒を移動させるクロスライドのマイクロメータの誤差、円筒面の形状誤差も含まれている。しかし、いずれの誤差も $\pm 5 \mu\text{m}$ 以上の誤差の主因とはなり得ない。図中の d_m は最小 2 乗円の直径である。この値と表 1 の直径（マイクロメータによる 3 回の測定の平

Fig. 13 Position measurements (PSD, sandy surface)

均値)との差も大きい。基準とする円を最小2乗法により決定することも含め、位置の測定精度については今後の検討が必要であろう。

4.3 傾きの測定

傾きは、PSD、粗面の場合のみ測定できた。結果を図14に示す。式(3)、図5の $x_{S1}-x_{S2}$ はプローブの復調器出力の平均値に比例するが、図14の測定ではこの出力電圧が一定値(1 V)になる位置で測定している。この電圧は、傾き 0° の測定面上での光点間隔に換算すると、 $\theta=90^\circ$ で約 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\theta=30^\circ$ で約 $150\text{ }\mu\text{m}$ となる。

図14より、傾き測定の分解能、直線性は 5° 程度であり良くはないが、2.4節で述べた傾き測定の原理は確認できたと言えよう。なお、傾き 0° で出力が0 Vにならないが、これは式(3)の演算を行う割算器のオフセット調整不十分のためである。

4.4 測定のまとめ

表1は本論文の実験結果をまとめたものである。表中の○印、×印は、それぞれ測定可能、測定不能の場合を示している。測定可能例は、変位、位置、傾きの順に少なくなっている。これを増すためには、光学系の構成、電子回路の改良が必要であると思われる。

変位測定の標準偏差 σ は、変位 $0\text{ }\mu\text{m}$ 位置での10回の測定出力電圧の標準偏差を、測定面変位に換算した値である。測定面位置合わせのばらつき、変位読取り用電気マイクロメータの誤差も含まれるが、主として受光素

Fig. 14 Inclination measurements (PSD, sandy surface)

子から出力回路までのゆらぎによる出力電圧の変動が、測定値のばらつきの原因と思われる。一般的に σ は粗面、旋削面、研削面の順に大きい。これは、研削面のように受光素子への入射光量が少ない場合、受光素子出力電圧が減少し、相対的に回路によるゆらぎ成分が大きくなるためと考えられる。ただし、 σ の数値 $0.02\sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$ は実用的には十分な値と思われる。

変位測定の線形範囲の数値は、受光素子と光線の交差角 θ により決まり、測定面の性状にはよらない。受光素子としては、QPDよりもPSDが広い線形範囲があり、変位測定には適している。しかし、線形性を考えなくてよい位置測定にはQPDで十分対応できている。

5. 結 言

本論文では、測定面の変位、位置、傾きの測定が可能な光学式非接触プローブについて、主として実験的に検討した。これを要約すれば次のようになる。

- (1) 2光線又は4光線を測定面の近くで交差させ、測定面上の光点の像を受光素子上に作り、像の位置関係から測定面の変位、位置、傾きを測定することが

Table 1 Performance of the experimental probe

Detector	θ	Surface	Displacement σ and linear range	Position	Inclination
QPD	90°	Sandy	○ $0.02\text{ }\mu\text{m}$	○	×
		Lathed	○ $0.05\text{ }\mu\text{m}$ $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$	○	×
		Ground	○ $0.05\text{ }\mu\text{m}$	×	×
	30°	Sandy	○ $0.6\text{ }\mu\text{m}$	○	×
		Lathed	○ $0.5\text{ }\mu\text{m}$ $\pm 300\text{ }\mu\text{m}$	○	×
		Ground	×	×	×
PSD	90°	Sandy	○ $0.05\text{ }\mu\text{m}$	○	○
		Lathed	○ $0.08\text{ }\mu\text{m}$ $\pm 200\text{ }\mu\text{m}$	○	×
		Ground	×	×	×
	30°	Sandy	○ $0.2\text{ }\mu\text{m}$	○	○
		Lathed	○ $0.3\text{ }\mu\text{m}$ $\pm 800\text{ }\mu\text{m}$	×	×
		Ground	○ $0.7\text{ }\mu\text{m}$	×	×

The symbols ○ and × express a successful measurement and an unsuccessful one respectively

できることを説明した。

- (2) 測定原理を確認するために、光学式非接触プローブの実験モデルを構成した。光線は2光線とし、交差角は90°と30°とした。受光素子としては、4分割フォトダイオード及び半導体位置検出器の2種を用いた。測定対象とした面は、粗面、旋削面、研削面、いずれも円筒面である。
- (3) 構成した実験モデルにより測定を試みた。変位は、ほとんどすべての場合で測定可能であり、標準偏差、線形範囲とも実用的に十分な値であった。位置は、円筒面の形状測定として行ったが、粗面、旋削面で測定可能であった。測定された円筒断面形状の誤差は比較的大きかった。傾きは、粗面を半導体位置検出器を用いて測定する場合のみ測定できた。分解能は5°程度であった。

今後は、測定面の性状によらずすべての測定を可能と

すること、位置、傾きの測定精度の向上を図ることを目標に、光学系、電子回路の改良を進めるとともに、プローブの小形化について検討する予定である。終わりに、本論文の実験に協力された東京工業大学大学院生(現・三菱重工)、後藤和宏君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 田部井 誠, 上田光宏: レーザ光と1次元イメージセンサを用いた表面形状測定装置の試作, 光学, 11, 6 (1982) 173.
- 2) 例えば, 非接触光学変位計“オプトケータ”, セレクトティブエレクトロニクス社カタログ.
- 3) J. R. Vyce: An Optical Noncontacting Surface Sensor, Appl. Opt., 8, 11, (1969) 2301.
- 4) 例えば, フォトニックセンサ, メカニカルテクノロジー社カタログ.
- 5) 例えば, レーザ干渉システム, ヒューレットパッカード社カタログ.

情 報

(p.1116より続く)

〔工作機械技術振興賞(奨励賞)〕

▽二部品間の組み立て関係を利用した構造モデリングの基礎研究=旭川高専・田川和弘, 古川正志, 橋本直樹, ▽旋盤用チャックの把握圧力分布=秋田高専・佐藤文雄, 鈴木照光, 門脇義次, ▽多関節型知能ロボットに関する研究(感覚機能を持つ4自由度のマイコン制御)=群馬高専・常見浩水, 千明俊司, 高久有幹, 小川侑一, ▽メカトロニクス駆動系の特性測定と制御系の設計——パーソナルコンピュータを用いたDCサーボアンプ系の特性解析=豊橋技科大・栗山利夫, 山崎和雄, ▽ロボット組み立て作業シミュレーションにおける干涉チェック=名古屋工大・西尾臣司, 佐竹隆史, 神谷数司, 橋本英雄, ▽ベルト研削加工における基礎的研究(ベルト切刃の構造とその変動特性, 仕上面粗さの時間依存特性, 切刃の寿命特性)=富山高専・清水龍人, 北吉信雄, 馬渡哲夫, 舟見恵一, 宇尾平二, 白山政敏, ▽回転電極による超硬合金の放電加工=新潟大・田中好, 田代恵治, 筒井忠夫, 田村武夫, ▽生産システムにおける機械グループと部品ファミリの新しい構成法, フレキシブル生産システムの構造設計(代替機械を考慮したセル型生産システムの構成法)=大阪府大・小川秀策, 植杉雄起, 津村俊弘, 大場史憲, 大阪教育大・加藤清, ▽直線案内機構における遊びの表示について=広島大・姫宮誠, 坂本武司, 浜村司郎, 浮田裕司, ▽球状黒鉛鋳鉄の切削に関する研究——

工具材種と被削面粗さについて, 工具の切れ刃に生ずる溶着物および切削抵抗について=九州産業大・日名子吉博, 立石彰, 高橋隆一郎, 日高昭人, 上野拓, 井上繁, ▽鋼の研削特性におよぼす熱処理の影響=琉球大・伊東和男, 平敷兼貴, 糸村昌祐, 福本功

〔試験研究助成対象〕

▽情報積算法を用いた工程設計法および生産スケジューリング法の研究(継続)=日本工作機械工業会, 早大理工学部(中沢弘教授), ▽超音波による機械加工面の残留応力計測に関する研究(同)=同, 東大生研(佐藤寿芳教授), ▽通電加熱切削法の小型工作機械への応用の研究(同)=日本小型工作機械工業会, 東洋大工学部(上原邦雄教授), ▽工作機械用静圧空気案内および軸受システムのCAD=日本工作機械工業会・日本小型工作機械工業会・慶大理工学部(稲崎一郎教授), ▽コンクリート構造工作機械の実用化=日本工作機械工業会, 機械振興協会技研(上野滋, 神田雄一研究員), ▽マシニングセンターにおける直線運動精度検査の高度化=日本光学測定機工業会, 長岡技術科学大学工学部(高田孝助教授), ▽セラミックを被削材とする切削技術に関する研究=ダイヤモンド工業協会・超硬工具協会・日本工具工業会, 機械振興協会技研(鋤柄重雄, 笠木達夫研究員)・神戸大工学部(岩田一明教授) (服部 敏夫)