

高精度金型の自動加工システムの開発

慶応義塾大学 理工学部 機械工学科

教授 三井公之

(平成元年度研究開発助成 AF - 89014)

1. 研究の背景

近年の小品種大量生産から多品種小量生産への生産形態の変化の影響を受け、自動車や家電製品などあらゆる製造分野で金型成型の高効率化への需要が高まっている。金型の形状加工についてはNC工作機械の発達により能率的な加工が可能となってきてはいるが、複雑な自由曲面で形成されることが多い高精度金型の自動加工システムの開発が強く要請されている。

ことに、金型表面の研磨作業はいまだに手作業に頼る比率が高く、またその作業は熟練を要するため自動化が著しく遅れている。これまでもロボットによる金型磨きの自動化が試みられており、国枝らは磁力研磨工具を用いてあらかじめ形状を測定した金型曲面を研磨する方法を提案している¹⁾。また、泉らは研磨力をフォースセンサで計測し摩擦係数が一定であることを利用して金型曲面の法線方向を計算しながら研磨を行う方法を提案している²⁾。いずれの場合も、金型の形状情報をいかにしてロボットに伝えるかが重要なポイントの一つとなっている。その一つの方法として、CAD/CAMデータを利用することも提案されているが、本研究では、ロボットがその運動経路をあらかじめ教示されることなく、自律的に金型の3次元形状を判断しながら研磨を行なう方法の開発を目的とした。すなわち、金型表面を研磨する際に発生する力をロボットハンドに取り付けた6軸フォースセンサにより検出し、その大きさと方向から研磨面の法線方向を判断し、かつ研磨力を任意の目標値に制御する方法を考案した。このとき、研磨工具の研磨面へ押しつけ力と工具の方向の制御にファジィ理論を適用した。また、使用し

た工具は金型研磨用のハンドグラインダに紙やすりを接着したゴムパッドを取付けたものを使用している。

また、金型加工技術の発展にともない、高精度自由曲面の表面粗さを非接触で高精度測定することの必要性が増している。平面の表面粗さ測定に関しては、触針式ならびに光干渉や光触針方式の粗さ測定法が種々用いられている。しかし、自由曲面の表面粗さ測定に対応し得る測定法は現状では皆無といつてよいであろう。このため、本研究では自由曲面の粗さ測定を実現するための基礎的研究として、非点収差法式の非接触光学式変位測定法に着目し、光学系のパラメータと、測定範囲・測定分解能の関連を、計算機シミュレーション及び実験により明らかにすることを試みた。

2. ファジィ制御理論を適用した金型研磨ロボット

2.1 研磨面の法線方向判断の方法

金型研磨工具として使用した紙やすりを接着したゴムパッドを用いて面の研磨を行なう際に発生する力の関係を図1に示す。

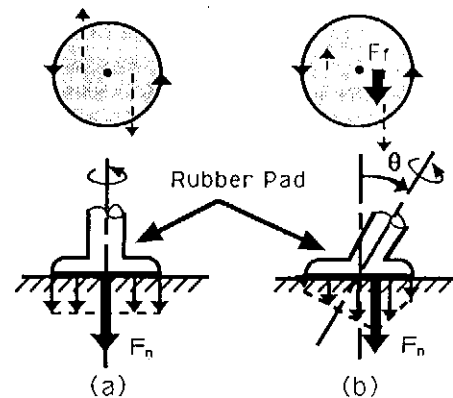


図1 コムパッドを用いた場合の研磨力の状態

図1 (a) のようにゴムパッドの軸線が面の法線方向と一致している場合は、軸線の周囲での接触圧力がほぼ対称になる。したがって、この時発生する研磨力も対称な偶力となるから、図に示すようにゴムパッドの接線方向に力は検出されない。しかし図1 (b) のように面に対して軸線が傾き、ゴムパッドが弾性変形した状態では、軸線回りの研磨力が非対称になるため接線方向の力 F_t が検出される。このとき接線力 F_t の方向は面の法線方向と傾いた工具の軸線が形成する面に対して垂直方向となる。そこで、接線力 F_t が0となるように工具の姿勢を調整すると工具の軸線は面の法線方向を向くことになる。接線力 F_t は軸線の傾き角 θ 以外に面の法線方向の押しつけ力 F_n の影響を受ける。いま、 R_t を接線力 F_t と法線方向の押しつけ力 F_n の比として次のように定義する。

$$R_t = F_t / F_n \quad \dots\dots\dots (1)$$

分力比 R_t と軸線の傾斜角 θ の関係を実測した結果を図2に示す。

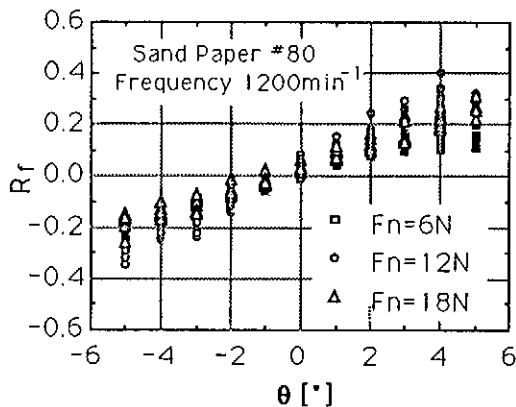


図2 工具の傾き角と分力比 R_t の関係

3種類の異なる押しつけ力について測定を行った。これより分力比 R_t は押しつけ力には無関係にほぼ一定で、傾斜角 θ のみの影響を受けることがわかる。したがって、研磨面の法線方向を研磨力から判断する際に、接線力 F_t の代わりに分力比 R_t を監視することにより、押しつけ力 F_n の変動の影響を取り除くことが可能である。ここで $\theta = 0$ に

おいて $R_t = 0$ となっていないが、これはロボットの位置決め誤差や研磨面のうねり等の形状誤差の影響と推定される。

2. 2 実験装置の構成

開発した金型研磨システムの概略を図3に示す。

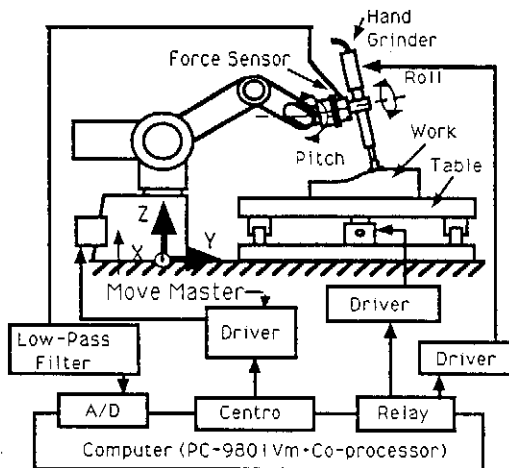


図3 開発した金型研磨システムの概略

また、主要部の外観を図4に示す。

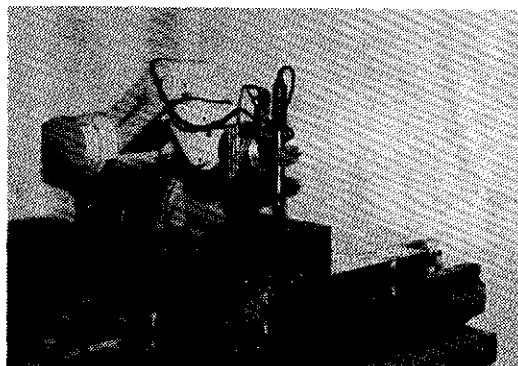


図4 開発した金型研磨システムの外観

5自由度多関節型ロボット (ムーブマスタ IIRV-M1) を使用し、アーム先端に歪みゲージ式の6軸フォースセンサを介してハンドグラインダを取付けた。ロボットは本体とドライブユニットから構成されていて、ティーチングボックスによりスタンドアロンでも、またコンピュータと接続することにより外部からの信号でも制御可能な汎用的なものである。本研究ではコンピュータによりセントロニクスインタフェースを介して制御し

た。ロボットの位置、角度の最小設定単位はそれぞれ0.1mm、0.1°で、位置繰り返し精度は±0.3mmである。ロボットの動作はPTP (Point To Point) 制御で移動位置が指定されると、あらかじめ指定された速度、加速度になるように軌道を計算、決定し、動作を行う。従って必ず動作終了時にはアームは停止するため連続した動作はできない。

金型研磨に必要な自由度数は位置決めには3自由度、工具の方向決定には回転工具を使用するため2自由度の計5自由度必要である。これはロボット本体のみで達成できるが、磨き動作の行える範囲が制限されるため、十分な動作範囲を得るため本システムでは1軸テーブルを追加することにより1自由度増やし計6自由度としている。1軸テーブルは独自のドライバを備えており、ドライバに対してRS-232Cを介して制御装置からコマンドを与えることができる。またリレー装置を使用することでコンピュータから運転の制御を行うことができる。本研究では、外部からの位置、速度指令を取り込み移動を行うプログラムを使用し、コンピュータからのプログラム運転指令(リレー装置による)によりテーブルを動作させるようにした。

ハンドグライダは実際の金型研磨にも使用されているもので、工具の交換は先端のチャックで行い、各種の工具を取付けることができる。本研究では1/4減速ギアを取付けることによりトルクを4倍に、回転数を500~3800rpmとした。コントロールユニットには外部入力も備わっており、回転のON/OFFと回転数の制御が可能である。

フォースセンサは(株) OMRON製で検出器とアンプで構成されている。このセンサは検出器に設定された互いに交差する3軸方向成分と各軸回りのモーメント成分の計6成分の力(モーメント)を検出することができ、アンプからDC±4V(定格出力)のアナログ電圧で検出値を出力する。また検出器は高剛性化されており動的荷重の検出に向いた構造で、メカニカルストップを備えている

ため許容過負荷が定格の500%以上となっている。グライндаでの研磨力を測定するために、フォースセンサとグライндаをロボットアーム先端に、フォースセンサのX軸がグライндаの軸方向を、Y軸がロボットアームのPitch回転軸と、Z軸がアームのRoll軸と一致するように取付けた。

制御は16ビットマイクロコンピュータ(NEC PC-9801Vm)で行ない、制御用ソフトウェアはC言語で記述した。

2.3 ファジィ制御理論の適用

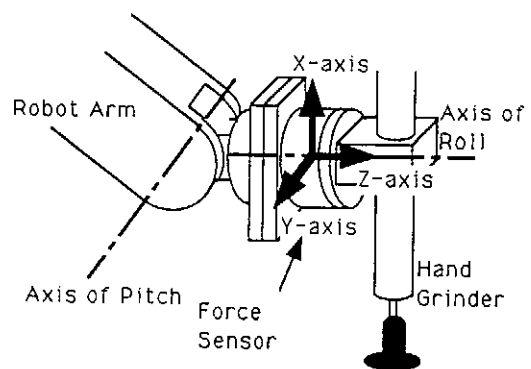


図5 フォースセンサの取付け状態

フォースセンサにより図5に示したX、Y、Z各軸方向の力を検出する。ここでX軸方向の力をグライнда軸方向押しつけ力 F_n にとる。このとき、Y方向の力 F_y とZ軸方向の力 F_z は、これが0となるようにそれぞれロボットアームのピッチ角とロール角を調整することによって、グライнда軸方向が研磨面の法線方向と一致するようにする。実際には、 F_y と F_z の代わりにそれぞれの押しつけ力 F_n との分力比 $R_p (= F_y / F_n)$ 、および $R_r (= F_z / F_n)$ を求め、これを0にするようにロボットアームの姿勢を制御した。ここで以後添え字pはピッチ角、rはロール角に関することを示し、#はpまたはrのいずれかを示すものとする。力に関する制御ルール(3)は前件部変数を検出された力 F_n と目標値 F_n^* との差 $F_e (= F_n - F_n^*)$ とし、後件部変数を工具軸線方向の制御量 ΔP^* (単位mm)とすると以下ようになる。

- 1a) If Fe is PB Then Δp^* is 0.6 (Z_1)
 - 1b) If Fe is PS Then Δp^* is 0.3 (Z_2)
 - 1c) If Fe is ZR Then Δp^* is 0.0 (Z_3)
 - 1d) If Fe is NS Then Δp^* is -0.3 (Z_4)
 - 1e) If Fe is NB Then Δp^* is -0.6 (Z_5)
- (ここで Δp^* は下向きを正としている。)

また、工具の方向に関する基本制御ルールについては前件部変数を R_{r*} とし、それぞれに対する後件部変数(制御量)を $\Delta \theta_p^*$ 、 $\Delta \theta_r^*$ として以下の通りとした。

- 2a) If R_{r*} is PB Then $\Delta \theta_p^*$ is 1.0 (Z_1)
- 2b) If R_{r*} is PS Then $\Delta \theta_p^*$ is 0.3 (Z_2)
- 2c) If R_{r*} is ZR Then $\Delta \theta_p^*$ is 0.0 (Z_3)
- 2d) If R_{r*} is NS Then $\Delta \theta_p^*$ is -0.3 (Z_4)
- 2e) If R_{r*} is NB Then $\Delta \theta_p^*$ is -1.6 (Z_5)

これらのルールから得られるメンバーシップ値 ω_n を次式に代入して後件部変数 $\Delta y (= \Delta p, \Delta \theta_p, \Delta \theta_r)$ を決定した。

$$\Delta y = \frac{\sum(\omega_n x z)}{\sum(\omega_n)} \dots \dots \dots (2)$$

面の方向の変化が大きい金型曲面部分の研磨においては、ある程度の方向変化に対する感度が必要であるが、平面部分ではかえって外乱による力の微小変動で不必要な工具の角度変位を生じてしまう。この微小変動は主にルール2b)と2d)に基づくものである。そこで曲面部分では感度を上げ、平面部分では感度を下げように変化させることを考え、次のような補正を行なった。すなわちピッチ角の制御量 $\Delta \theta_p$ とロール角の制御量 $\Delta \theta_r$ のそれぞれについて過去4回の和 (Sum #) を計算すると、これは曲面部分、すなわち、面の方向の変化が大きい場合には Sum # の値が大きくなる。そこで、Sum # を用いて以下のようにルールを設定しピッチ角方向、ロール角方向それぞれに定数 Z_2 と Z_4 を変化させた。

- 3a) If Sum # is PB Then Z_2 is 0.5
- 3b) If Sum # is ZR Then Z_2 is 1.0
- 3c) If Sum # is NB Then Z_2 is 0.5

$$Z_4 = Z_2 \times (-1)$$

ただし

$$\text{Sum \#} = \sum (\Delta \theta \#_i, t) \dots \dots \dots (3)$$

また、曲面の部分ではゴムパッドが片あたりを起こし、接触面積が減少するため、押しつけ力を一定に制御していたのでは平面部分と曲面部分で研磨圧力に差が生じる。この研磨圧力の差は磨き量の差になり仕上面の形状誤差を生む原因となる。これを補正するために力の目標値を初期設定値 F_0 にオーバーライド O_v をかけた $F_0 \cdot \hat{}$ ($= F_0 \times O_v$) とし、この O_v を Sum # により変化させた。この時ピッチ角方向の Sum # とロール角方向の Sum # の絶対値の大きいほうを使用した。

- 4a) If Sum # is PB Then O_v is 0.5
- 4b) If Sum # is ZR Then O_v is 1.0
- 4c) If Sum # is NB Then O_v is 0.5

以上のように設定したルールに対するメンバーシップ関数を図6に示す。

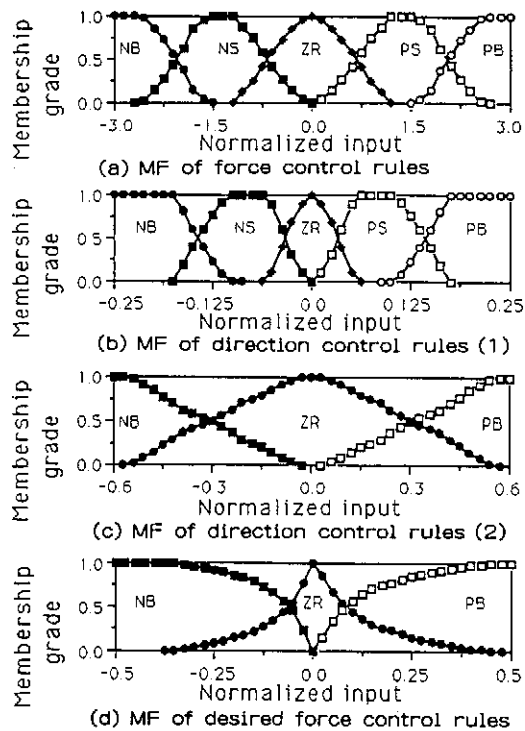


図6 使用したメンバーシップ関数

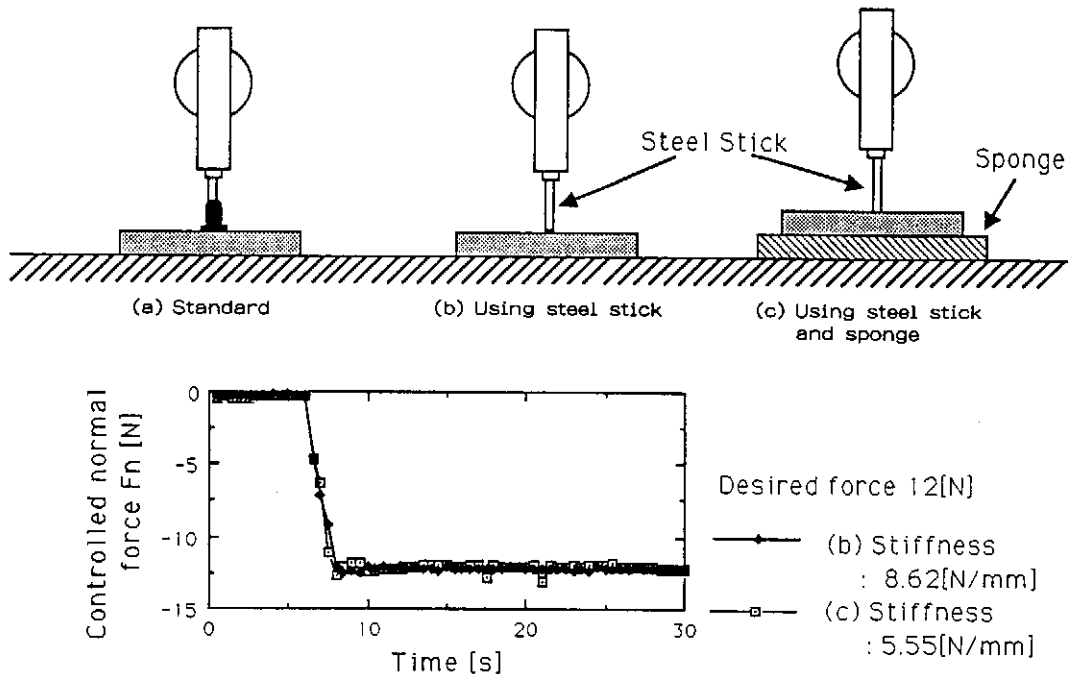


図7 力制御結果

図 (a) は力のルールのメンバーシップ関数で以下同様に (b) は方向のルールに、(c) は感度のルールに、(d) は目標値を変化させるルールに関するものである。

2.4 研磨試験結果及び考察

アームを静止させた状態で押しつけ力の目標値 F_0 を 12N として接触していないところから力制御を開始した結果を図7に示す。同図にはゴムパッドを用いた場合 (a) と代わりに金属棒を取付けた場合 (b)、金属棒を用い平面板の下にスポンジを敷いた場合 (c) を示した。図中の剛性はロボットアームを含む研磨システムの系全体として測定したものである。剛性が多少変化しても安定した力制御が行われている様子がわかる。

次にピックフィード 1mm の平面を有する金型の法線方向よりロール角が 10 度ずれた状態から、テーブル送り速度 1mm/sec でピックフィードに直角方向に研磨した際の結果を図8に示す。

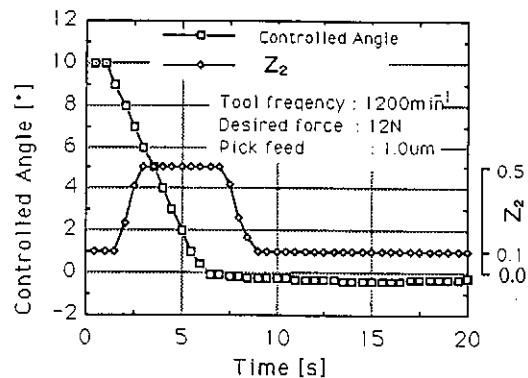


図8 軸方向の制御結果

始めは面とのずれ角が大きいいためルール3a) ~ 3c) が有効に働き、 Z_2 が0.5になり、工具軸が急速に法線方向に向かい、ほぼ法線方向に一致すると Z_2 が0.1になりピックフィードに影響されず安定

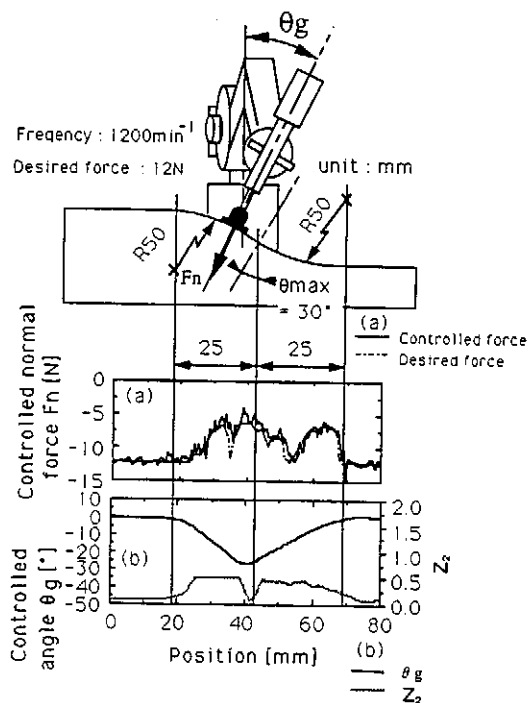


図9 2次元形状を有する金型の研磨制御結果

した研磨が行われている。図9に一方方向に一定の断面形状を持ちピックフィード1mmで加工した2次元金型の研磨を行った際の結果を示す。

研磨はピックフィードに平行な方向に行なった。同図 (a) の点線はルール4a) から4c) の曲面判断ルールにより補正された押しつけ力の目標値 F_d' で、平面部分では初期目標値 $F_d = 12\text{N}$ になり、法線方向の変化が大きいところでは小さくなっている。これに実線で示す制御結果も追従し良好な制御が行なわれていることがわかる。また同図 (b) に示した方向制御の結果 (ロール角) についても、鉛直方向からグラインダ軸傾斜角 θ_g は金型面の法線方向が鉛直方向から $0^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 0^\circ$ と変化するのに対し、ほぼ一致している。平面から曲面へ移行する際や、その逆、あるいは曲面の切り切り部がなだらかに変化しているが、これはゴムパッドの径 (20mm) の影響で平均化されたためである。

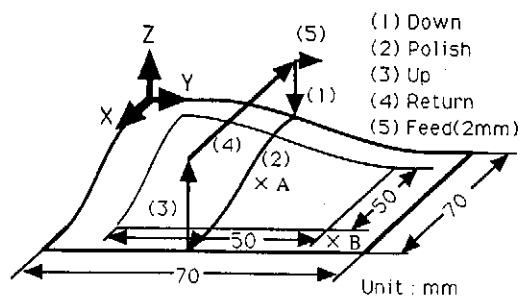


図10 3次元曲面を持つ金型と研磨工具経路 (A,Bは粗さ測定点)

次に図10に示すような3次元曲面を有する金型の研磨試験を行なった。図に示したように $50 \times 50\text{mm}$ の部分が3次元形状になっており Y-Z 面の断面は Cosin 曲線、X-Z の断面形状は2つの円弧を組み合わせた形になっている。金型の材質は S45C で $\phi 10\text{mm}$ のボールエンドミルで NC フライス盤によりピックフィード1mmで加工されている。研磨は紙やすりの番手を #80、#120、#240、#600、#1000 と変えて行なった後、さらにダイヤモンド遊離砥粒 (粒径 $9.0, 0.25\ \mu\text{m}$) を用い仕上げ加工を行なった。同じ番手および粒度について各2回研磨を行ない、1回目と2回目で研磨方向が 90° ずれるように設定した。研磨範囲は $70 \times 70\text{mm}$ で、1回目の研磨手順は図10に示すとおりである。研磨工程の進行にともなう金型表面の粗さの変化の様子を図11に示す。

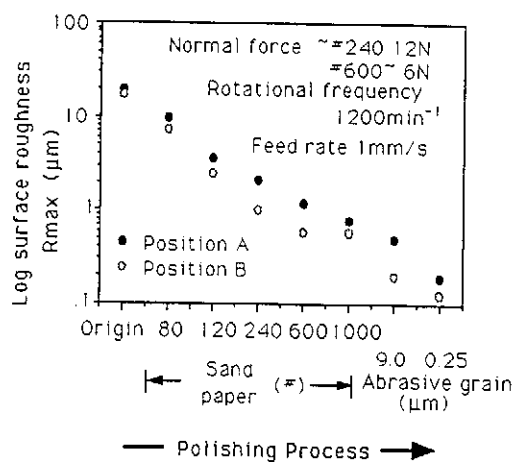


図11 粗さの変化

位置 A、B は図 10 に示した測定点を示す。研磨を重ねるごとに最大高さ粗さ R_{max} は徐々に改善され、最終的に $0.3 \mu m$ の鏡面が得られた。図 12 に研磨後の金型表面の状態を示す。

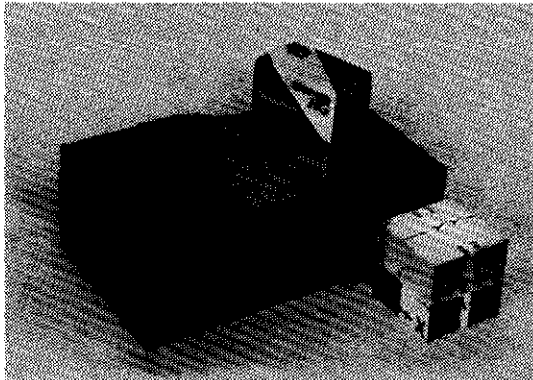


図 12 研磨後の結果

次に表面形状を金型の X 軸方向に 3 次元測定器で測定した結果を図 13 に示す。

図は連続する金型表面を 5 つの部分に区切って拡大して示してある。全体的に研磨量は一定になっている様子がわかる。しかし曲面から平面への抜け際部分については、同図 (e) のように、部分的な磨き過ぎが認められ、これにより研磨が平面部分に移行した後も面にうねりが生じているのが認められた。これらは曲面部分でのパッドの当たり方の違いに起因するものと考えられる。

2.5 まとめ

本研究では、自動化の遅れている金型磨き作業にロボットを適用し、生産性の向上を図ることを目的として、面の法線方向を教示することなく自動的に判断する新しい手法を考案し、ロボット研磨システムにより磨き試験を行いその有効性を確認した。

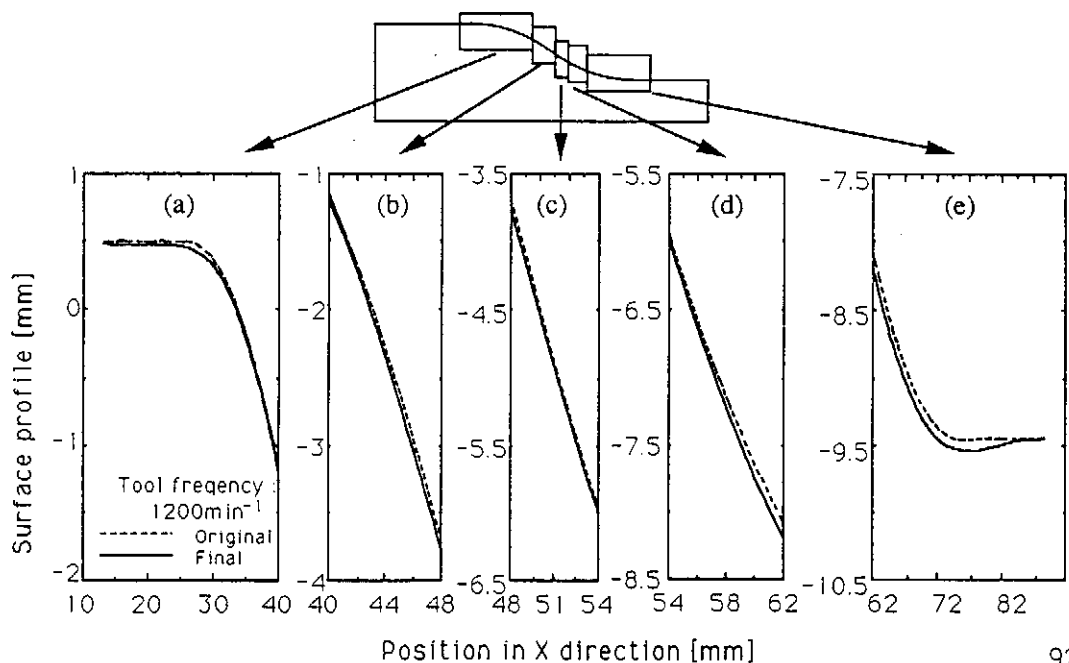


図 13 3次元金型の研磨前後での形状比較

以下に得られた知見を要約する。

1) グラインドによる研磨において発生する摩擦力により、面の法線方向を自動的に判断しティーチングレスで自由曲面に倣うための手法を考案した。本手法ではハンドグラインダとロボットアームの間に取付けたフォースセンサで研磨により発生する3分力を測定し、グラインド軸線方向の力 F_n と他の2方向の力 F_p と F_r をとり、その比が0となるように工具軸線を制御することにより、面の法線方向を判断した。またこの制御にファジィ理論を適用する方法を提案した。

2) 5自由度多関節型ロボットと1軸テーブルを使用した研磨システムを構築した。

3) 平面で基礎実験を行い、力制御が良好に行えることを確認した。ファジィ理論を適用することにより剛性の変化の影響を受けにくい制御が実現された。

4) 方向制御においては、曲面部分ではある程度の感度が必要となるが、平面ではかえって外乱に敏感過ぎるようになる。そこで、面の状態を判断しながら自動的に制御則の一部を変化させることにより、より最適な感度で制御を行えるように制御則を補正した。これにより、曲面の状態を問わない安定した制御が行われた。

5) 2次元、3次元の自由曲面を有する金型を準備し、適当な研磨条件を設定し磨き試験を行った。その結果、最終表面の中心平均粗さ R_a が約 $0.02\sim 0.05\mu\text{m}$ 、最大高さ粗さ R_{max} が約 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ にできることを確認した。また、3次元測定器により形状の測定、評価を行い、金型の磨き作業に対する本システムの適用可能性を示した。

以上のように提案したシステムによる金型磨き作業の自動化の可能性が示されたが、研磨面の形状に関してはうねりの発生が見られた。これは弾性工具を使用する場合ある程度避けられない問題であり、工具寿命を延ばすためにも弾性砥石などの新しい工具の開発が望まれる。

3. 自由曲面の非接触粗さ計測センサ

3.1 非点収差法による変位測定

光により非接触で測定物の粗さを求める方法はいくつかあるが、レンズにより測定表面に結像した光点の焦点位置からのずれにより変位を測定する方法が、測定精度、装置の小型化などの面から有利である。この信号の検出方法にはナイフエッジ法、フーコー法、臨界角法等があるが、本研究では円筒からのずれを検知する非点収差法⁹⁾を用いた。

図14は非点収差法の原理図である。図において、測定面からの反射光は、測定面が対物レンズの焦点に正しく位置するときには、図の②M点に焦点を結ぶように構成されているものとする。

円筒レンズの作用により、紙面に垂直な方向についてはM点は変わらないが、紙面に平行な方向についてはS点に焦点を結ぶので、F点ではスポットが真円になる。F点の位置に4分割フォトダイオードをおくと、フォトダイオード上のスポットは②の様になる。測定面が対物レンズに近づくと①のように焦点は M' 点及び S' 点に移動し、F点におけるスポット径は紙面に垂直な方向が大きく、紙面に平行な方向では小さくなり、フォトダイオード上のスポットは①の様な縦長の楕円になる。また逆に、測定面が対物レンズから遠ざかると③に示すような横長の楕円となる。このような楕円の形状変化による信号の変化を4分割フォトダイオードの各受光素子からの信号を $(A+B) - (C+D)$ なる演算結果として求めることができる。

3.2 光学系の計算機シミュレーション

本実験で用いた実験装置の構成に即した図15に示す光学系について計算機シミュレーションを行った。図15~19中の記号を以下のように定める。

f_1 : 対物レンズの焦点距離

f_2 : 結像レンズの焦点距離

f_3 : 円筒レンズの焦点距離

d_1 : 対物レンズ~結像レンズ間隔

d_2 : 結像レンズ~円筒レンズ間隔

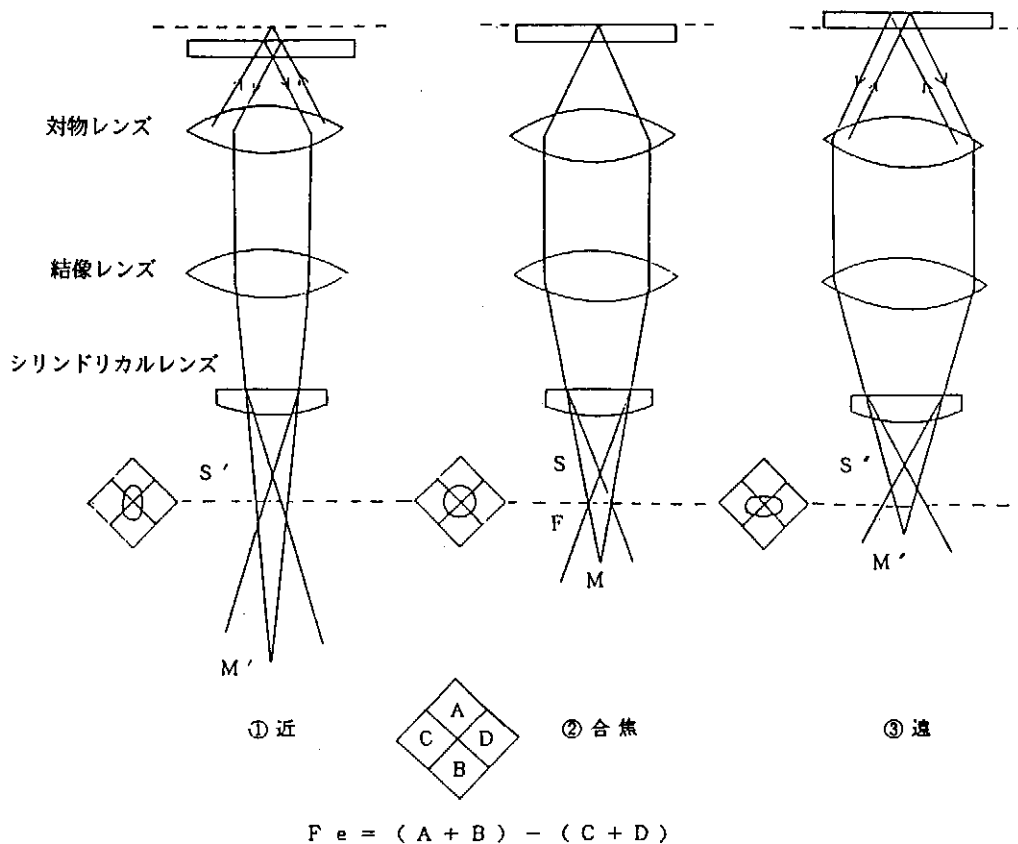


図14 非点収差法の原理

d_3 : 円筒レンズ～4分割フォトダイオード面間隔
 a : 対物レンズの有効半径

対物レンズの焦点位置に測定面がある場合、反射光は平行光となる。測定面が Δ だけ焦点位置より離れた場合には、 $f_1 + 2\Delta$ の位置に点光源があるかのように取り扱えばよいことになる。対物レンズによる結像点と対物レンズとの距離 b_1 は、単レンズの結像公式により次のように表される⁹⁾(図16)。

$$\frac{1}{b_1} - \frac{1}{f_1 + 2\Delta} = \frac{1}{f_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$b_1 = \frac{f_1(f_1 + 2\Delta)}{2\Delta} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この b_1 に集光する光を結像レンズを介して収光したときの集光点までの距離 b_2 は、円筒レンズが

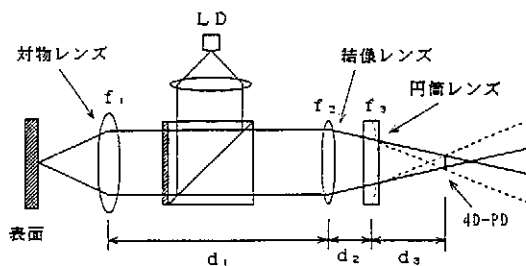


図15 非点収差法光学系の構成

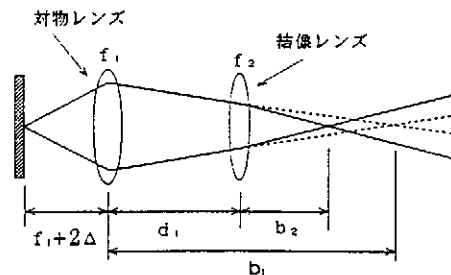


図16 対物レンズと結像レンズによる結像

無いと仮定した場合、次のように求められる。

$$\frac{1}{b_2} - \frac{1}{b_1 - d_1} = \frac{1}{f_2} \quad \text{..... (6)}$$

$$b_2 = \frac{(d_1 - b_1)f_2}{(d_1 - b_1) - f_2} \quad \text{..... (7)}$$

同様に、円筒レンズのレンズ作用を受ける断面の光路は、図17に示す距離 b_3 に集光する。

$$b_3 = \frac{(d_2 - b_2)f_3}{(d_2 - b_2) - f_3} \quad \text{..... (8)}$$

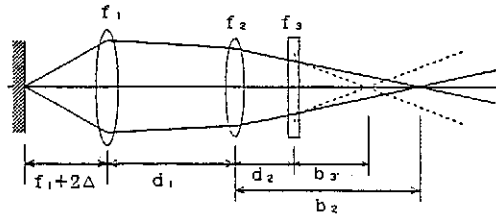


図17 円筒レンズによる結像

測定面が近づいたときの対物レンズにおけるビーム半径を、図18に示すように a_1 とすると、

$$a_1 = \frac{a}{f_1} (f_1 - 2\Delta) \quad \text{..... (9)}$$

となる。

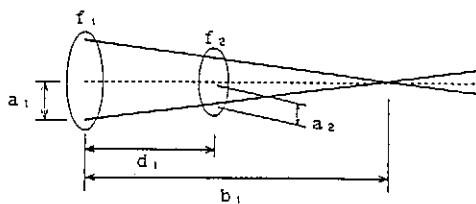


図18 対物レンズと結像レンズにおけるビーム半径

測定面が遠ざかったときは $a_1 = a$ となる。結像レンズにおけるビーム半径 a_2 は、

$$a_2 = \frac{b_1 - d_1}{b_1} a_1 \quad \text{..... (10)}$$

となり、円筒レンズにおけるビーム半径 a_3 は、レ

ンズ作用がある断面では、結像レンズの場合と同様に、

$$a_3 = \frac{b_2 - d_2}{b_2} a_2 \quad \text{..... (11)}$$

となる。4分割フォトダイオード面上のビーム半径 a_{4x} (図19) は、

$$a_{4x} = \frac{b_3 - d_3}{b_3} a_3 \quad \text{..... (12)}$$

となり、シリンドリカルレンズのレンズ作用のない断面での4分割フォトダイオード上のビーム半径 a_{4y} は、

$$a_{4y} = \frac{b_2 - (d_2 + b_3)}{b_1} a_2 \quad \text{..... (13)}$$

となる。

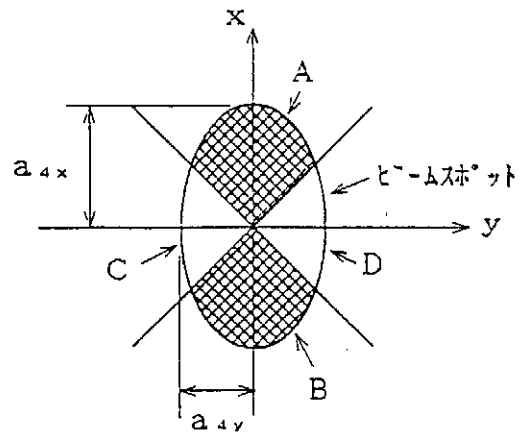


図19 4分割フォトダイオード上のビームスポット

フォーカシング・エラー信号 Fe のS字曲線の形状は、図19における4分割フォトダイオードのA、B、C、Dの各部の面積から求めることができる。

図における4分割フォトダイオードスポット面積 S は、

$$S = \pi a_{4x} a_{4y} \quad \text{..... (14)}$$

4分割フォトダイオード受光部Aの面積 S_a は、

$$S_a = \left| \frac{a_{4y}}{a_{4x}} \right| \left(\frac{\pi a_{4x}^2}{2} - x \right) + x^2$$

$$(\chi = \chi_0(a_{4x}^2 - \chi_0^2)^{1/2} + a_{4x}^2 \sin^{-1}(\frac{\chi_0}{|a_{4x}|}))$$

$$(\chi_0 = \frac{a_{4x} a_{4y}}{(a_{4x}^2 + a_{4y}^2)^{1/2}}) \dots\dots\dots (15)$$

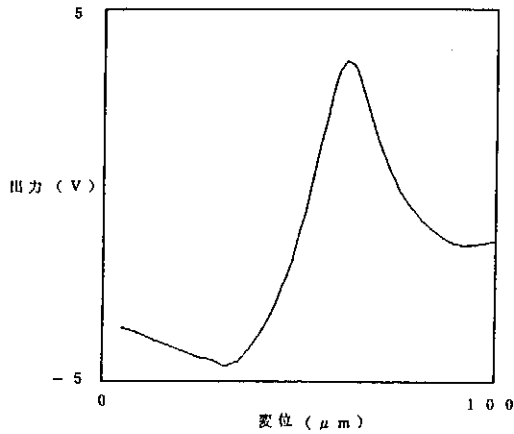
となり、フォーカシング・エラー信号 Fe は、次のようになる。

$$F_e = (S_A + S_B) - (S_C + S_D) = 4S_A - S \dots\dots\dots (16)$$

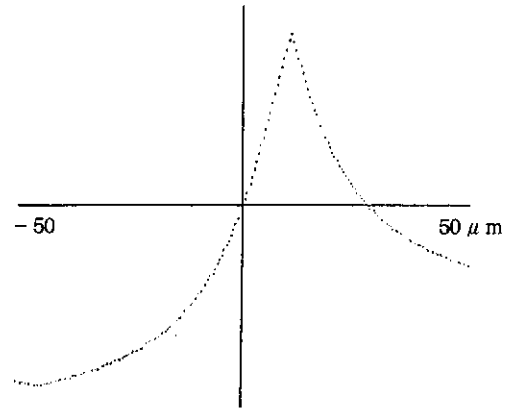
以上の計算結果にもとづきシミュレーションプログラムを作成し、鏡の変位と出力信号との関係

を求めた。ここで、シミュレーションにより求められる出力信号は、4分割フォトダイオード上に結像する光点像の面積にもとづいて計算され、フォトダイオードの電圧出力への換算は行っていないため、シミュレーション結果の縦軸の単位は記していない。

結像レンズの焦点距離 f_2 、結像レンズと円筒レンズとの間隔 d_2 を変えてシミュレーションを行った結果の二、三の例を図 20 (b) ~ 図 22 (b) に示す。

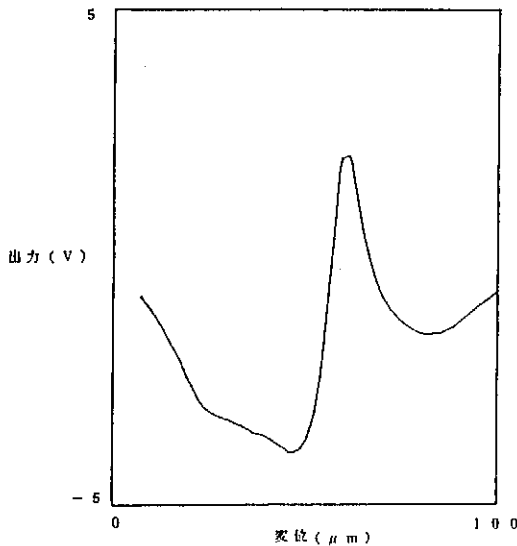


(a) 実験

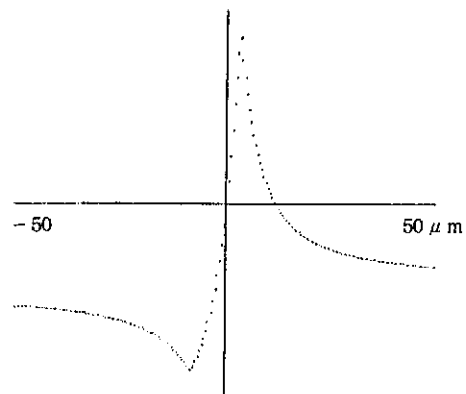


(b) シミュレーション

図 20 出力-変位特性曲線
($f_2=200\text{mm}$, $f_3=40\text{mm}$, $d_1=20\text{mm}$, $d_2=125\text{mm}$)



(a) 実験



(b) シミュレーション

図 21 出力-変位特性曲線
($f_2=200\text{mm}$, $f_3=40\text{mm}$, $d_1=20\text{mm}$, $d_2=160\text{mm}$)

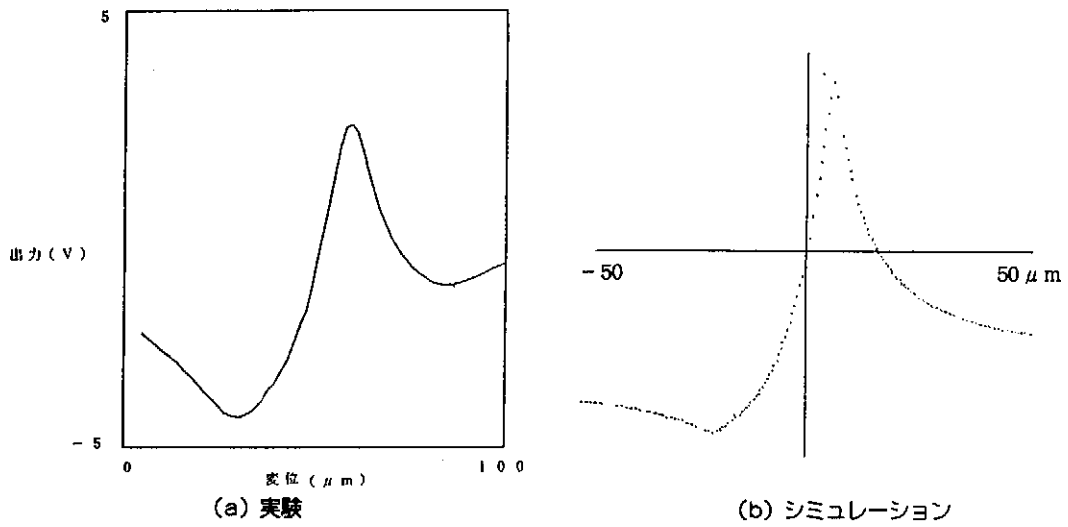


図22 出力-変位特性曲線
 $(f_2=220\text{mm}, f_3=40\text{mm}, d_1=20\text{mm}, d_2=160\text{mm})$

3.3 実験による非点収差法の特注測定

図23に本研究で用いた実験装置の構成を示す。半導体レーザからの光を2枚の円筒レンズにより円形になるように整形し、コリメータレンズによりビーム径を拡大する。対物レンズにより収光された光は、マイクロメータヘッドに取り付けた鏡面により反射される。反射光はビームスプリッタ

により90°方向を変え、結像レンズ、円筒レンズを経て4分割フォトダイオードに入射する。既に述べている原理により、電子回路により4分割フォトダイオードの出力信号を演算処理することにより、対物レンズと鏡との間の距離を求めることができる。

尚、本実験装置は、光学系のパラメータを変化

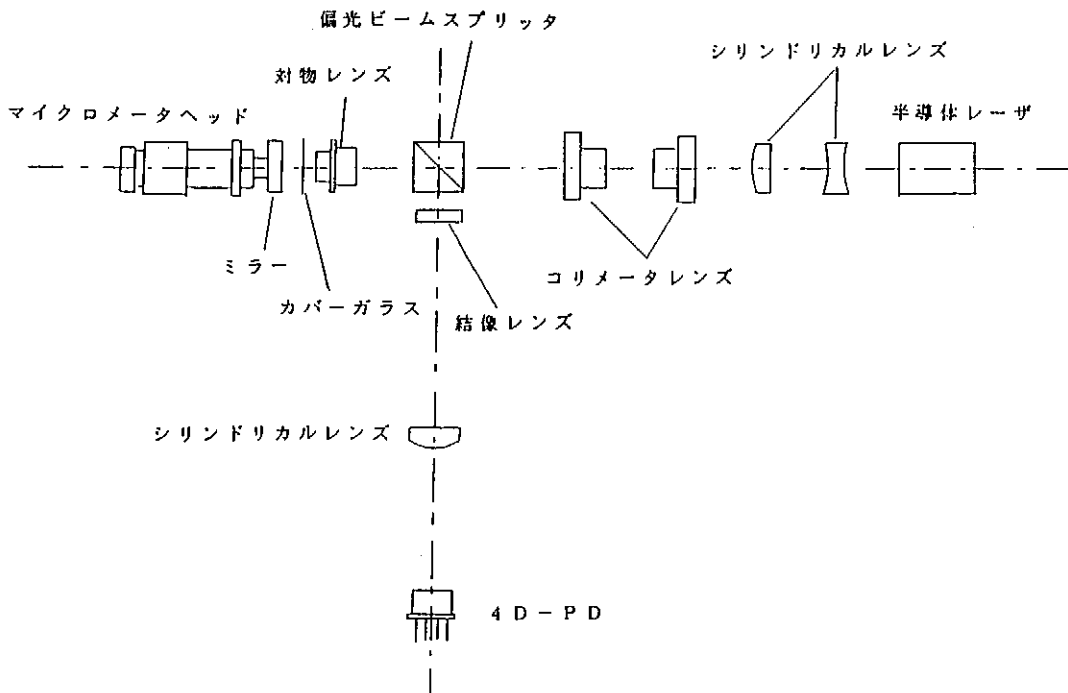


図23 実験装置光学系の構成

させたときの、出力特性を求めることを目的として設計したもので、結像レンズ及び円筒レンズを交換できること、結像レンズと円筒レンズの間隔ならびに円筒レンズと4分割フォトダイオードの間隔を自由に換えられることが特徴となっている。

上記の装置において、マイクロメータヘッドによって鏡を移動させ、それによる出力信号を記録した。尚、鏡の移動量を精度良く求めるために、電気マイクロメータを用いてこれを測定している。

結像レンズの焦点距離 f_s 、結像レンズと円筒レンズとの間隔 d_s を変えて求めた鏡の移動量と出力電圧との関係の二、三の例について図20(a)～図22(a)に示す。これは、前記シミュレーションの結果と比較し得るものである。

3.4 まとめ

本研究では半導体レーザを用いた非点収差法実験装置を試作し、光学系のパラメータを種々変えて、非点収差式変位測定法の特性測定を行った。また、計算機シミュレーションによる特性計算を行い両者を比較した。本研究の主な結論をまとめると以下のようなになる。

1) 実験とシミュレーションにより求めた特性曲線

の線形範囲が良く一致することを示した。

2) 光学系のパラメータと特性曲線との関連に関し、結像レンズと円筒レンズの間の距離が短い方が線形範囲が大きいこと、結像レンズの焦点距離が長い方が線形範囲が大きいこと、円筒レンズと4分割フォトダイオードの間の距離が長い方が線形範囲が大きいことが明らかになった。

尚、今後の課題としては、金型などの自由曲面の粗さ測定に本測定法を適用するにあたって必要となる、面の傾斜と測定値との関連について研究すること、対物レンズを圧電素子などで駆動することにより、凹凸の差が大きい測定対象にも適用可能とすることが求められる。

参考文献

- 1) 国枝ほか、精密工学会誌、54-1 (1988) 125.
- 2) 泉・ほか、日本ロボット学会誌、4-2 (1986) 27.
- 3) 菅野、ファジィ制御、日刊工業新聞社、(1988) 67.
- 4) 三井ほか：高感度非接触表面粗さ計の開発、精密工学会誌、53、2 (1987) 328.
- 5) 村山ほか：光ディスク技術、ラジオ技術社 (1990) 99,