

高精度金型の自動加工システムの開発

三井公之* 青山藤詞郎**

1. まえがき

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分野で金型成型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その自動化が進んでいるが、複雑な自由曲面で形成されることが多い金型表面の研磨（磨き）作業についてはいまだに手作業に頼る比率が高く、またその作業に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。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を考案した。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である。研磨の際に発生する力を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提案した。ここで、研磨工具の研磨面への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測定することの必要性が増している。平面やレンズ表面の粗さ測定に関しては、光干渉方式を中心に種々の非接触測定法が用いられているが、自由曲面の表面粗さ測定は、光干渉方式では困難である。このため本研究では光触針方式の表面粗さ測定法に対し、対物レンズをアクチュエータで制御する方式を導入した測定法についての試みについて述べる。

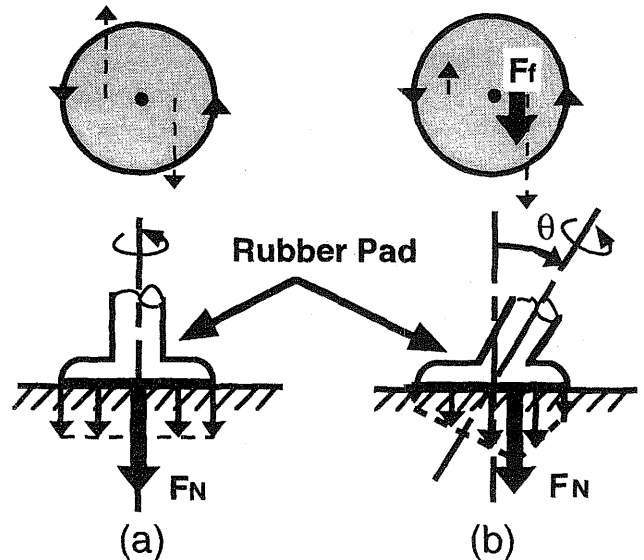


図1 ゴムパッド使用時の研磨力の状態

2. 金型研磨ロボットの開発

2.1 研磨面の法線方向判断の方法

使用した紙やすり付きのゴムパッドで面の研磨を行なう際に発生する力をモデル化して図1に示す。図(a)のように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。しかし同図(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_f が検出される。このとき F_f 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、 F_f が0となるように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_f 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_f を接線力 F_f 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。

$$R_f = F_f / F_N \quad (1)$$

このとき、分力比 R_f と軸線の傾斜角 θ の関係を実測した結果、押しつけ力 F_N の変動に無関係に分力比 R_f はほぼ一定で、傾斜角 θ のみの影響を受けることがわかった。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_f の代わりに分力比 R_f を監視することにより、押しつけ力 F_N の変動の影響を除外することができる。

2.2 開発した自動研磨システムの構成

開発した金型研磨システムの概略を図2に示す。5自由度多関節型ロボット（ムーブマスタ I I R V・M 1）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。フォースセンサはセンサのX軸がグラインダの回転軸に、Y軸がロボットのピッチ軸に、Z軸がロール軸にそれぞれ一致するように固定した。研磨が可能な範囲を広くとる目的で、金型を1軸のDCサーボ駆動を持つテーブル上に固定し、テーブルに一定の送りを与えながら、ロボットの運動を制御して研磨を行なう方法を考案した。制御はパーソナルコンピュータで行ない、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

フォースセンサにより図3に示したX、Y、Z各方向の力を検出する。ここでX軸方向の力をグラインダ軸方向押しつけ力 F_n にとる。このとき、Y方向の力 F_p とZ軸方向の力 F_r 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、グラインダ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_p と F_r の代わりにそれぞれの押しつけ力 F_n との分力比 R_{fp} ($=F_p/F_n$)、および R_{fr} ($=F_r/F_n$)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_d との差 F_e ($=F_n - F_d$)とし、後件部変数を工具軸線方向の制御量 Δp^* (単位mm) とすると以下のようになる。

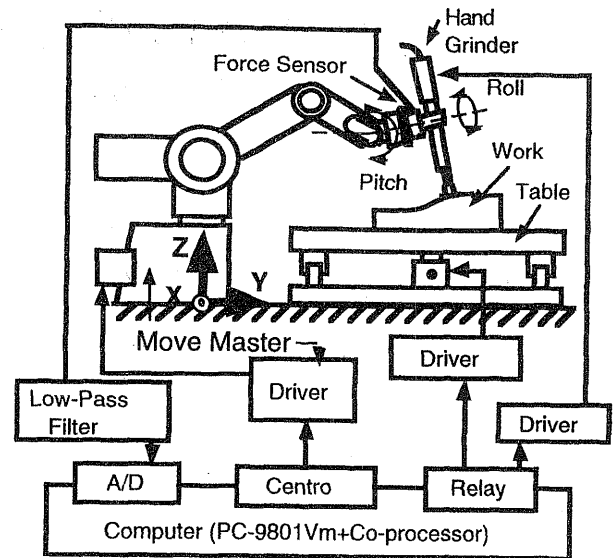


図2 開発した金型研磨システムの構成

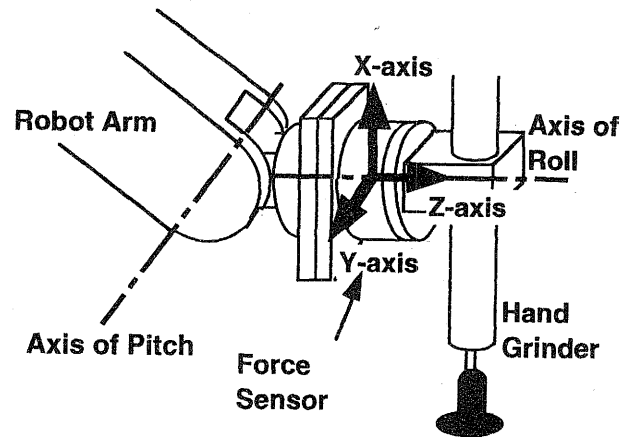


図3 フォースセンサの取り付け状態

- 1a) If F_e is PB Then Δp^* is 0.6 (Z1)
 - 1b) If F_e is PS Then Δp^* is 0.3 (Z2)
 - 1c) If F_e is ZR Then Δp^* is 0.0 (Z3)
 - 1d) If F_e is NS Then Δp^* is -0.3 (Z4)
 - 1e) If F_e is NB Then Δp^* is -0.6 (Z5)
- (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 $R_{f\#}$ とし、それぞれに対する後件部変数(制御量)を $\Delta \theta_{p^*}$ 、 $\Delta \theta_{r^*}$ として以下のとおりとした。

- 2a) If $R_{f\#}$ is PB Then $\Delta \theta_{\#}^*$ is 1.0 (Z1)
- 2b) If $R_{f\#}$ is PS Then $\Delta \theta_{\#}^*$ is 0.3 (Z2)

- 2c) If Rf# is ZR Then $\Delta \theta \#$ is 0.0 (Z3)
- 2d) If Rf# is NS Then $\Delta \theta \#$ is -0.3 (Z4)
- 2e) If Rf# is NB Then $\Delta \theta \#$ is -1.0 (Z5)

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

$$\Delta y = \frac{\sum (\omega_i \times Z_i)}{\sum (\omega_i)} \quad (2)$$

$$\sum (\omega_i)$$

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2 b)と2 d)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Z2とZ4を変化させた。

- 3a) If Sum# is PB Then Z2 is 0.5
 - 3b) If Sum# is ZR Then Z2 is 0.1
 - 3c) If Sum# is NB Then Z2 is 0.5
- $$Z4 = Z2 \times (-1)$$

ただし、 $Sum\# = \sum (\Delta \theta \#, t) \quad (3)$

また、曲面の部分ではゴムパット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_d にオーバーライド O_v をかけた F_d' ($=F_d \times O_v$)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4に示す。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。

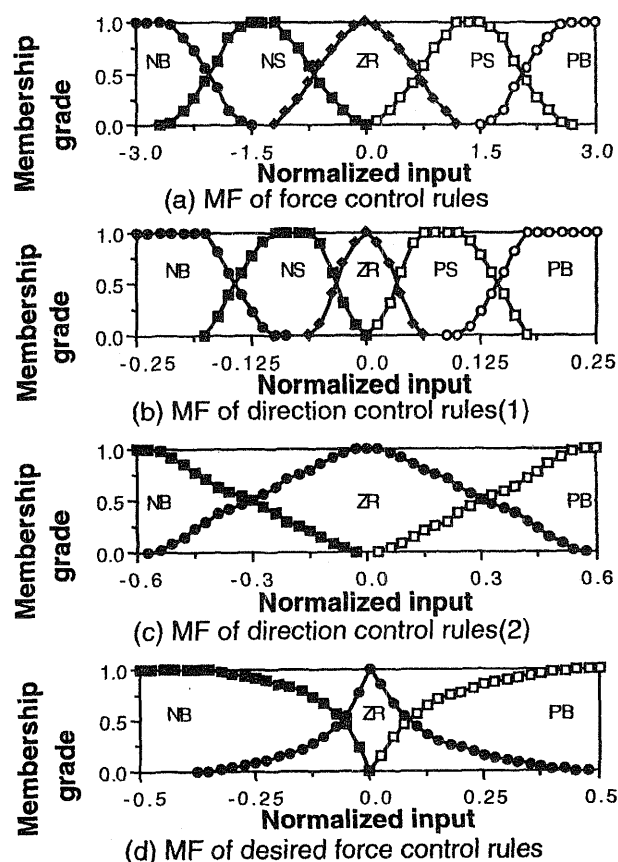


図4 使用したメンバーシップ関数

2.4 研磨試験結果とその評価

アームを静止させた状態で、押しつけ力の目標値 F_d 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5に示す。同図にはゴムパットを用いた場合(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。図中の剛性は研磨システムの系全体として

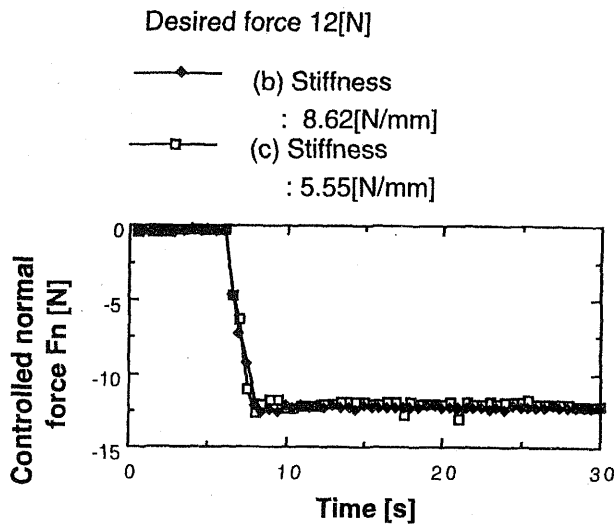


図5 研磨力制御の結果

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。図6に一方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)

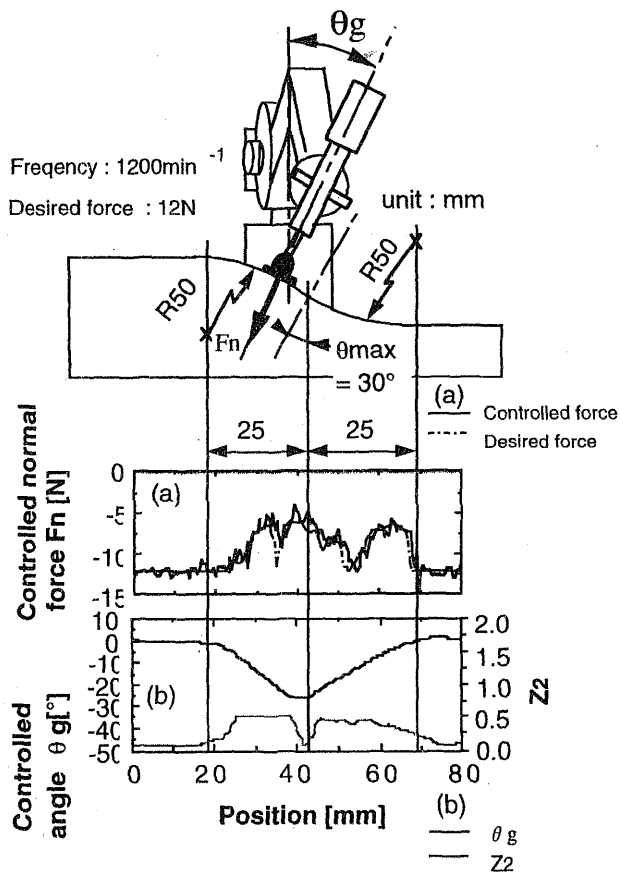


図6 2次元形状を有する金型モデルの研磨試験結果

の点線はルール4 a) から4 c) 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、鉛直方向からの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換わり部がなだらかに変化しているが、これはゴムパットの径(20mm)の影響で平均化されたためである。

次に図7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 \cos 曲線、X・Z面の断面形状は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 μm)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7に示すとおりである。研磨工

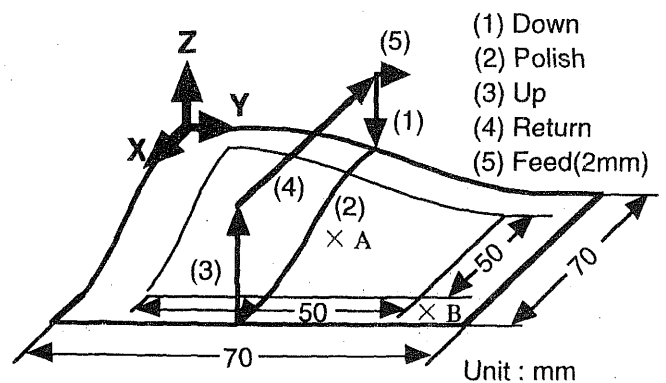


図7 3次元曲面を持つ金型の研磨方向

程の進行にともなう金型表面の粗さの変化の様子を図8に示す。位置A, Bは図7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 $0.3 \mu\text{m}$ の鏡面が得られた。図9に研磨後の金型表面の状態を示す。鏡面が得られている様子がわかる。

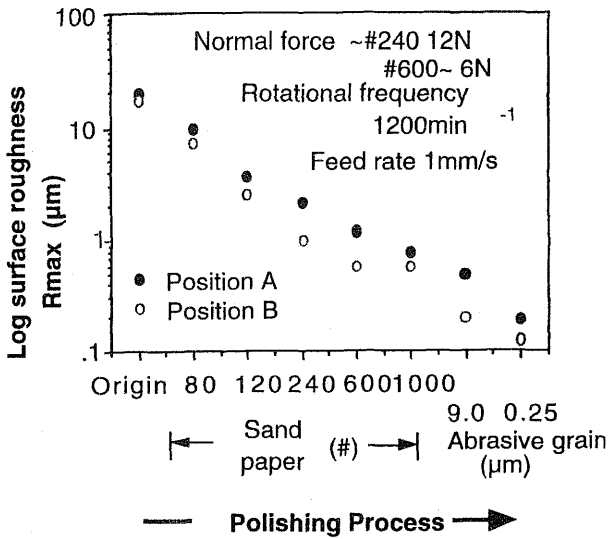


図8 研磨面粗さの変化

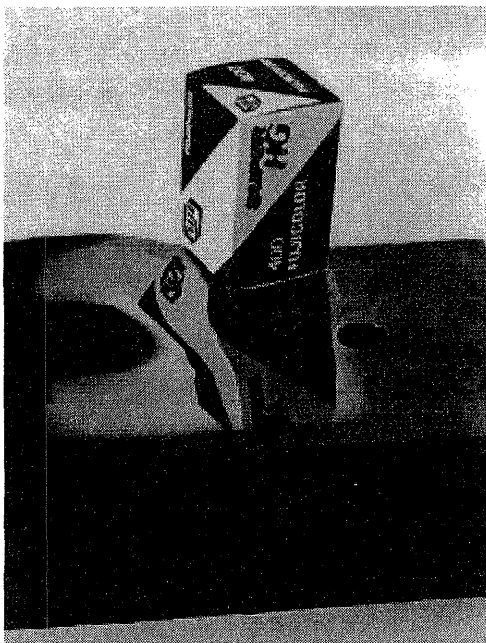


図9 研磨面の様子

3. 自由曲面の非接触粗さ計測センサ

3.1 非点収差式光学ヘッド

光により非接触で測定物の表面粗さを求める方法は多く研究されている。これらのうち、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を知ることにより断面形状を測定する光触針法が、測定精度、測定装置の小型化などの面から有利である。

図10は光触針法の一つの方式である非点収差法³⁾を採用した光学ヘッドの構成を示すものである。4分割フォトダイオードの各素子の出力信号を $A_1 \sim A_4$, $B_1 \sim B_4$ として、断面曲線に対応する信号は次式により評価される。

$$S = \frac{(A_1 + A_3) - (A_2 + A_4)}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} - \frac{(B_1 + B_3) - (B_2 + B_4)}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}$$

また、図11は測定表面と対物レンズ間の距離の変化と出力電圧の関係を求めた実験結果である。使用した対物レンズは、N.A. (開口数) 0.8, 倍率60倍の顕微鏡対物レンズである。変位と出力の関係がほぼ直線的に変化しているのはおよそ $1 \mu\text{m}$ の範囲であることがわかる。その測定範囲は測定感度と密接に関連しており、光学系のパラメータを変えることにより測定感度

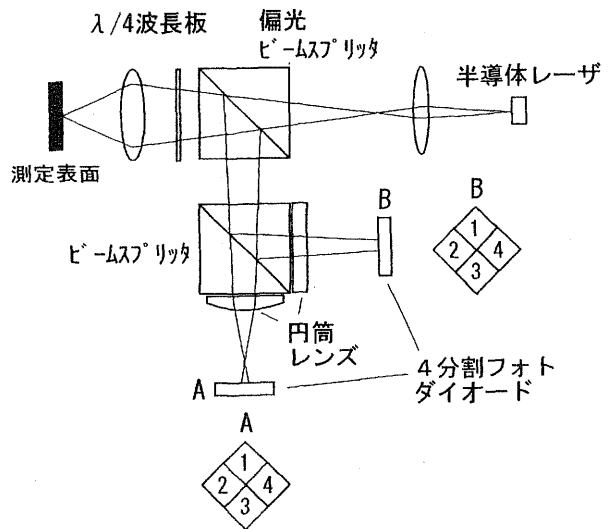


図10 非点収差式光学ヘッド

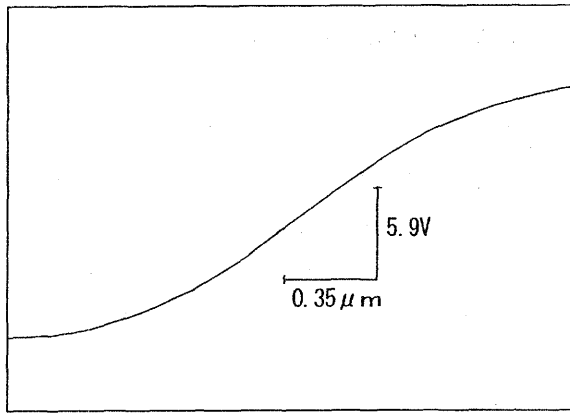


図 1 1 焦点位置誤差と出力信号の関係

と測定範囲を変えることができる。例えば、対物レンズとして開口数 0.65, 倍率 40 倍のものを使用すると、測定範囲を $3\mu\text{m}$ 以上とれることを確認している。

しかし、金型の表面形状や粗さを評価する用途に使用するためには、測定範囲を飛躍的に拡大することが必要である。本研究では、対物レンズを圧電素子により駆動することにより、非点収差検出器の測定範囲を拡大することについて述べる。

3.2 フォーカシングユニット

圧電素子駆動対物レンズフォーカシングユニットを中心とした測定装置の構成を図 1 2 に示す。このユニットを非点収差式光学ヘッドと対物レンズとの間に取り付けることにより、測定ヘッドを改造することなく対物レンズを微動することが可能となる。また、この対物レンズ微動機構は、剛性が高いために、ボイスコイルを使用した対物レンズフォーカシング機構と異なり、レ

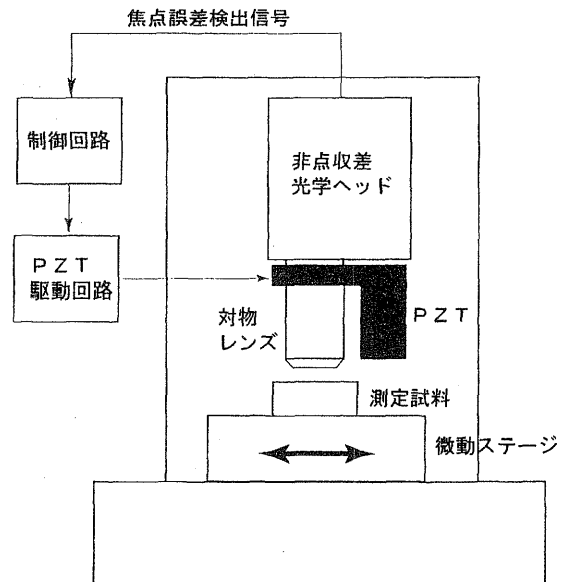


図 12 装置構成

ンズを水平方向に向けることも可能で、例えば真円度測定機用の非接触センサとして用いることなど、汎用性の高い検出器を実現できることが特長である。対物レンズの微動範囲は $100\mu\text{m}$ である。

図 1 3 には制御系のブロック線図を示している。非点収差検出器の出力信号は積分要素、ノッチフィルタを経て圧電素子駆動用高圧アンプに入力される。この圧電素子駆動用高圧アンプにおいて、信号は 10 倍に増幅され積層型圧電素子に電圧が印加される。対物レンズの焦点面に測定面が一致するとき、非点収差検出器の出力信号は 0V になるので、これが常に 0V に保たれるように圧電素子に印加する電圧を制御する。対物レンズフォーカシングユニットは、 250Hz 近辺にて共振点をもつので、ループゲインを高めるためにノッチフィルタを圧電素子駆動用高圧アンプの前に置いている。

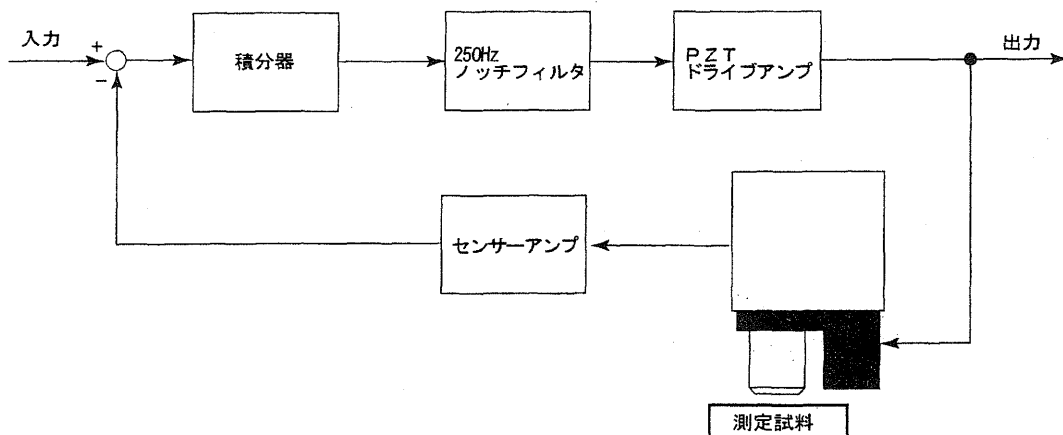


図 1 3 制御系ブロック線図

3.3 旋削加工面粗さ測定への適用

旋削加工したアルミニウム合金製の試験片を作成し、その表面粗さ測定を行った。直径 30mm のアルミニウム合金製の円柱を、回転数 270rpm、送り 0.2mm/rev. にて加工し試料を作成した。本測定装置による測定結果を図 14 に示す。図には対物レンズフォーカスユニットの変位量（上段）と非点収差ヘッドよりの出力信号（下段）の両者を示している。非点収差ヘッドの出力には 0.1 μ m 程度の信号が現れている。これは、対物レンズフォーカスユニットの駆動速度の制約により追従できなかった表面粗さ成分が測定されているもので、本測定法で求められる表面形状は、対物レンズフォーカスユニットの変位量と非点収差ヘッドの出力信号の和として求められる。ここには示していないが、この測定結果は触針式粗さ計により求めた測定結果とほぼ一致した結果となっている。

4. まとめ

ファジィ理論を金型磨きロボットの運動制御に適用し、対象となる金型研磨面の法線方向を自動的に判断しながら、一定の押しつけ力で自動研磨を行なうロボ

ットシステムを開発することができた。

研磨ロボットの運動制御にファジィ理論を適用し、力と工具軸線方向の制御を行なった結果、安定した力制御が実現できた。また工具軸線方向の判断についても、自律的にルールの一部を変更し感度を調整しながら判断するようにした結果、平面および曲面においていずれも良好な制御結果が得られた。

3次元曲面を有する金型を研磨した結果、金型表面の最大高さ粗さ R_{max} は 0.3 μ m となり、良好な鏡面を得ることができた。

また、自由曲面の表面粗さ測定に適した光触針方式の表面粗さ測定法について、その測定範囲を拡大するために対物レンズを圧電素子にて駆動する方式の装置及び制御系の構成について述べ、旋削加工面の粗さ測定に適用した結果について示した。

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) 三井ほか：高感度非接触粗さ計の開発, 精密工学会誌, 53-2(1987)328.

* 慶応義塾大学理工学部 機械工学科 教授

** 慶応義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 教授