

表 2.1 拡張限界感度法による θ と PID の設定値

制御グレード	動作	θ	K_p	T_I	T_D
$I_d/I_a=1.05$	PI	$0.03 T_u$	$0.53 K_u$	$0.88 T_u$	-
	PID	$0.014 T_u$	$0.63 K_u$	$0.49 T_u$	$0.14 T_u$
$I_d/I_a=1.2$	PI	$0.05 T_u$	$0.49 K_u$	$0.91 T_u$	-
	PID	$0.043 T_u$	$0.47 K_u$	$0.47 T_u$	$0.16 T_u$
$I_d/I_a=1.5$	PI	$0.14 T_u$	$0.42 K_u$	$0.99 T_u$	-
	PID	$0.09 T_u$	$0.34 K_u$	$0.43 T_u$	$0.2 T_u$
$I_d/I_a=2.0$	PI	$0.22 T_u$	$0.36 K_u$	$1.05 T_u$	-
	PID	$0.16 T_u$	$0.27 K_u$	$0.4 T_u$	$0.22 T_u$

表 2.2 制御グレード

G	説明
1.05	アナログと同等の制御成績を得る場合
1.2	中間
1.5	
2.0	アナログよりも制御成績が劣っていてもよい場合

限界感度法の本になっている演算式を以下に示す。

$$G_c = \frac{K(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)}{(1 + 0.1T_D s)} \quad (2.10)$$

2.4.2 制御グレードの導入

制御グレード G は I_a をアナログ制御における制御成績の値, I_d をデジタル制御における制御成績の値とし, $G = I_d / I_a$ と定義する. まずデジタル制御においてアナログ制御の制御成績と同等の制御成績を得られると考えられるサンプリング周期を $G = 1.05$ で定義する. 表 2.2 に制御グレードの具体的な意味付けを示す.

しかし制御対象によっては, アナログ制御で最適調整したときの制御成績よりも制御成績がかなり悪くても十分な場合が多い. よって制御成績は制御対象ごとに指定される許容値を満足すれば十分であり, それ以上に制御成績を向上させる必要はない. これらのことを考慮し制御グレードの値を定める. 実用上サンプリング周期は長いほど容易かつ経済的である. たとえば, 演算速度の遅い CPU の使用や, 変換相度の遅い A - D コンバータを利用することが可能になる.

2.5 ステップ動作による精密位置決め

超音波モータは回転子の慣性が小さく応答性に優れていることから, 位置決めサーボ用のモータとしての応用が期待されている.

よって, 超音波モータの位置決め精度を調べるためにステップ単位の送り・戻しの実験を行う. 今回使用したロータリエンコーダの分解能は 2048 であり, つまり最小で $0.176[\text{deg./pulse}]$ のステップ動作が実現可能であると考えられる.

3.1 実験装置

実験装置を図 3.1, 3.2 に示す.

3.1.1 ステータ

図 3.3, 3.4 に実験に使用したステータを示す. ステータの径は $\phi 100[\text{mm}]$, 弾性体部分の材質は SUS420J であり, 圧電体部分は PZT(ジリコン酸チタン鉛) 厚さは $0.3[\text{mm}]$ であり, ロータとの接触面の裏側にあたる部分に接着されている. 圧電体には, 図 3.5 にある符号の示すように, 隣り合う部分の分極が逆になるように厚み方向にポーリングが施してある. またそれとは別に, 同図の無符号の部分には, フィードバック電極とするためのポーリングが施してある. フィードバック電極はステータのたわみ振動を, 圧電現象により電極間に生じる電圧の変化から観察するためのものである. 圧電帯表面には電極として, ポーリング区分と同じ区分けで, 片面は相ごとに銀を蒸着してある. 配線は電極面に半田付けにより行う.

3.1.2 ロータ

ロータは 66 ナイロンにガラス繊維を 30% 充填させたもの(N66GF30)を使用した.

3.1.3 回転角測定装置

超音波モータの制御実験の，回転角測定のためにロータリーエンコーダを用いた．以下にその概略を表 3.1, 3.2 に示す．

表 3.1 ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダ	製造元	HEWLETT PACKARD
	名称	クイックオンタイプ 光学式ロータリーエンコーダ
	形式	HEDS - 5500
	分解能	512 CPR
	最大応答周波数	100 kHz
	出力信号	A 相, B 相 2 チャンネル出力

表 3.2 カウンタボード

カウンタボード	製造元	コンテック
	名称	プログラマブル ユニバーサルカウンタモジュール
	形式	CNT24-4A(98)H
	チャンネル数	4 チャンネル
	使用機能	2 相入力・24 ビットカウンタ プログラマブルタイマ

3.1.4 使用機器の仕様

ステータは、波形発生器から出力された位相の異なった 2 つの正弦波によって進行波を発生する。このとき波形発生器から出力させる電圧はアンプを中継することで 40 倍に拡大される。表 3.3, 表 3.4 に各機材の使用を示す。

表 3.3 波形発生器

任意波形発生器	製造元	東亜電波工業
	形式	FS-2121 任意波形
	出力波形	水平軸 8192 ポイント 垂直軸 4096 ポイント
	出力波形電圧	~5Vpp
	出力周波数	サンプルレート 0.01Hz~25.6MHz
	2チャンネル間位相差	0° ~360°

表 3.4 アンプ

アンプ	製造元	エヌエフ回路設計ブロッ ク
	名称	高速電力増幅器
	形式	4020
	最大電圧	-150V~150V
	最大電流	2Arms, 5.66App (40Hz~200kHz)
	利得	0° ~360°

3.1.5 コントローラ

計測・計算には、パーソナルコンピュータを用い、計算された制御入力を波形発生器に入力するために GP - IB(General Purpose Interface Bus)を使用した。その概略を表 3.5, 3.6 に示す。

表 3.5

パーソナルコンピュータ	製造元	NEC
	形式	PC - 9821 FA

表 3.6 GP - IB

GP - IB	製造元	CONTEC
	名称	高速型 GP-IB モジュール
	形式	GP - IB(98)F
	チャンネル数	1 チャンネル IEEE-488(GP-IB)規格準拠
	転送形式	8 ビットパラレル 3 線ハンドシェイク方式
	転送速度	受信 : 60Kbyte/sec MAX 送信 : 60Kbyte/sec MAX

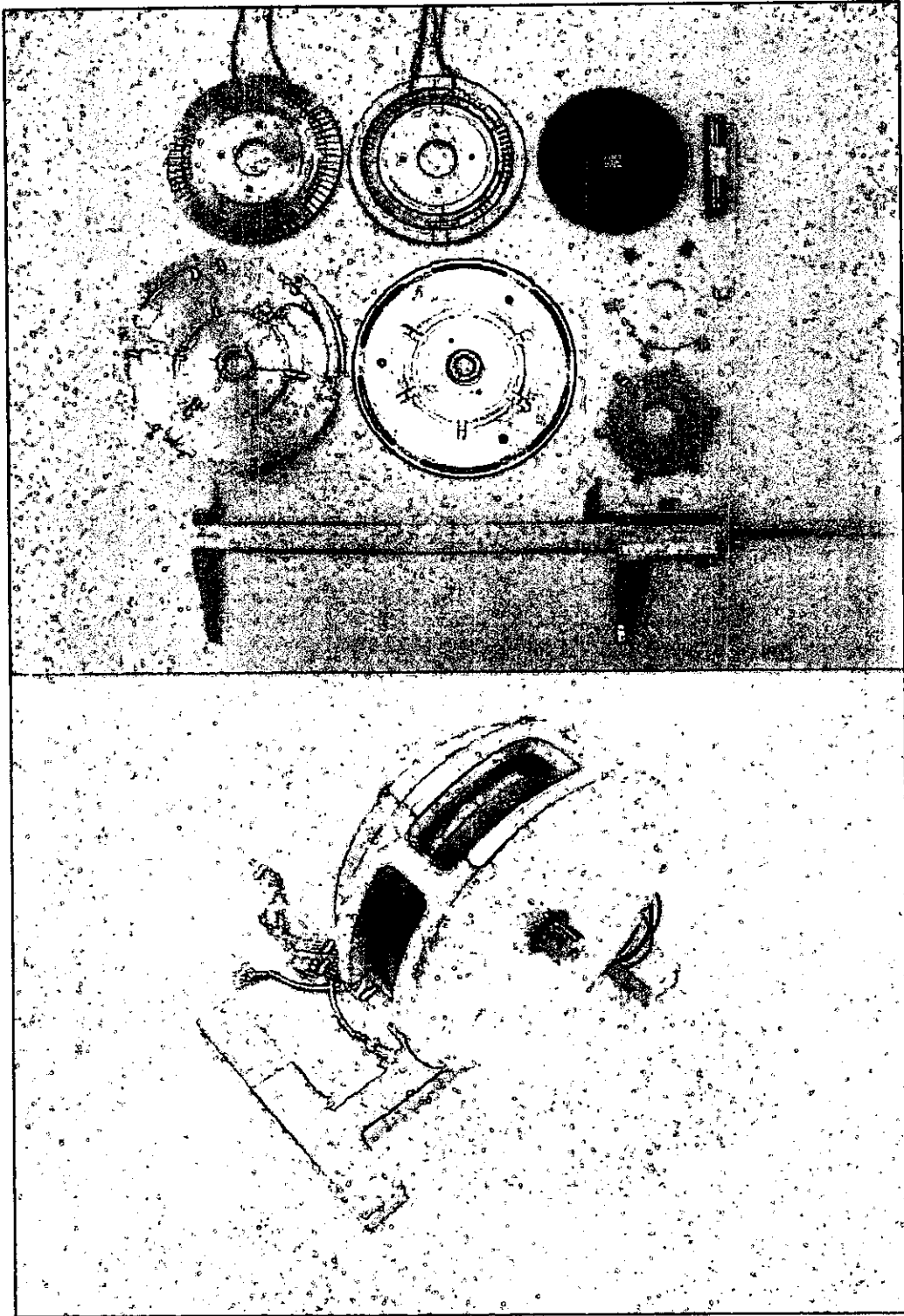


图 3·1 实验装置

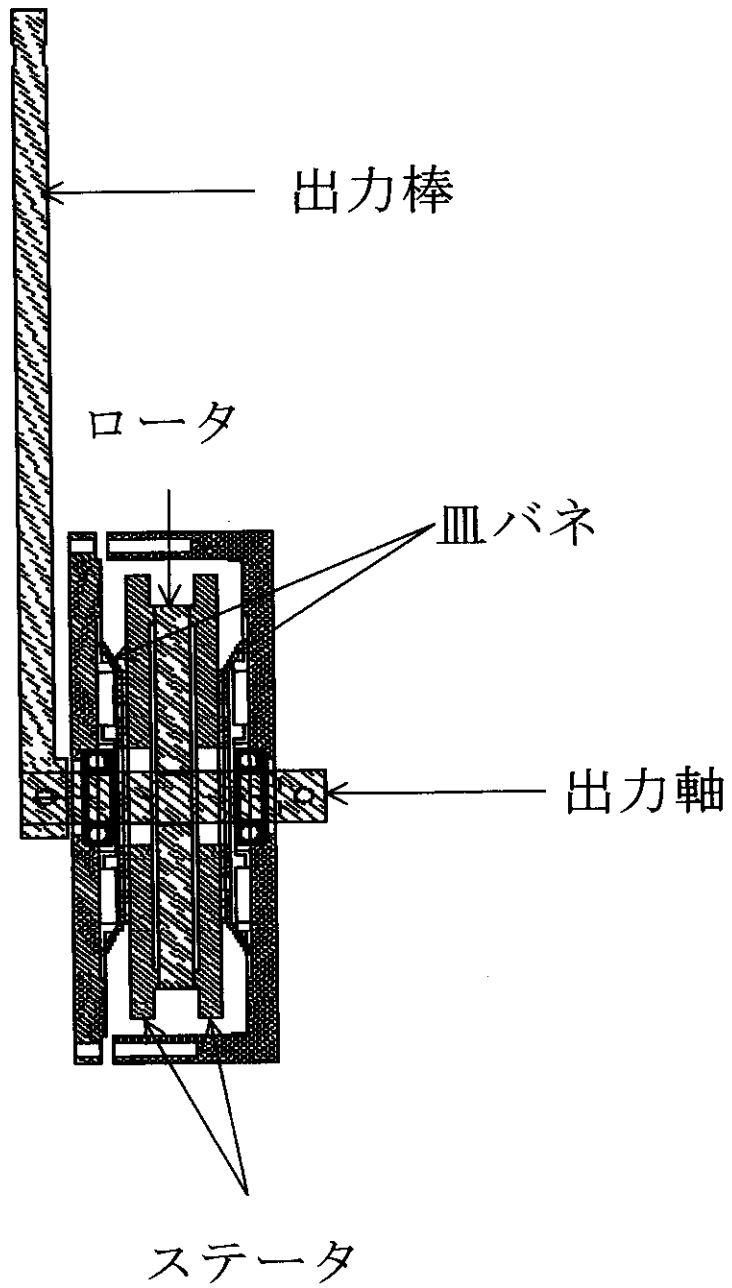


図 3・2 モータの内部構成

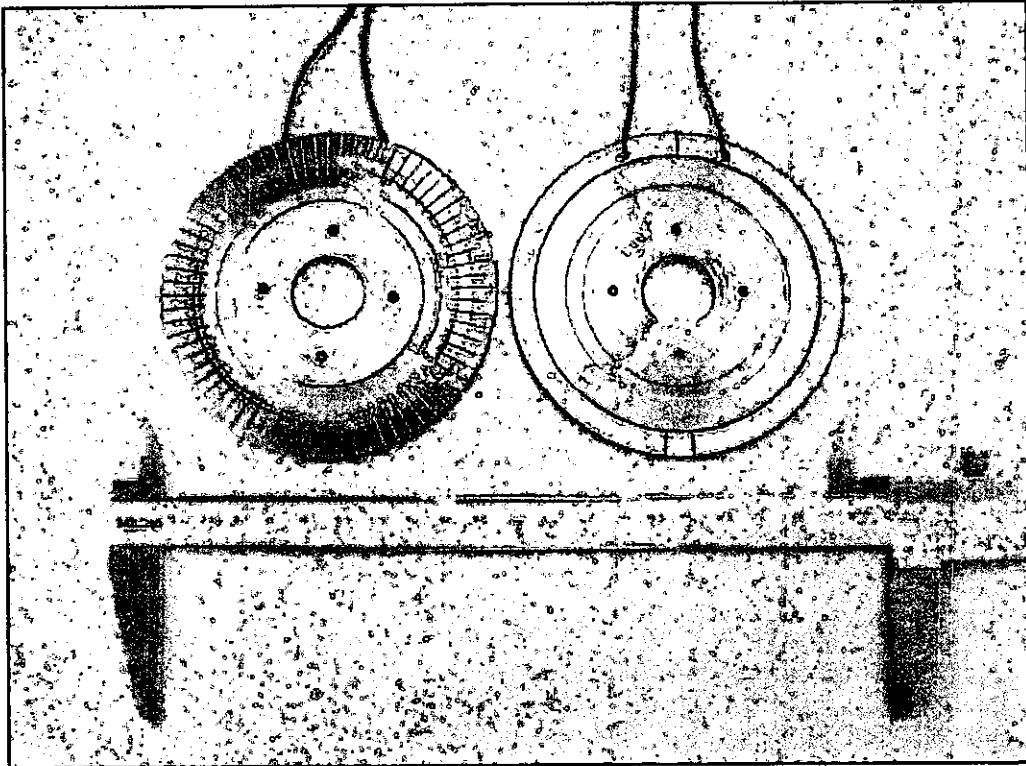
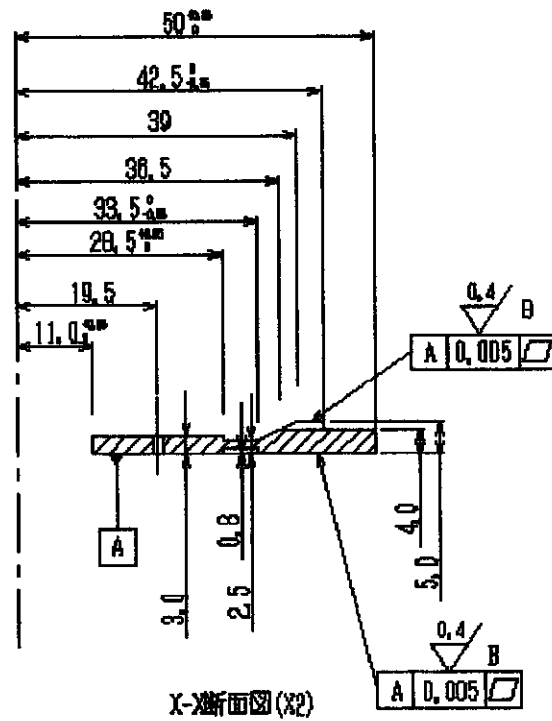
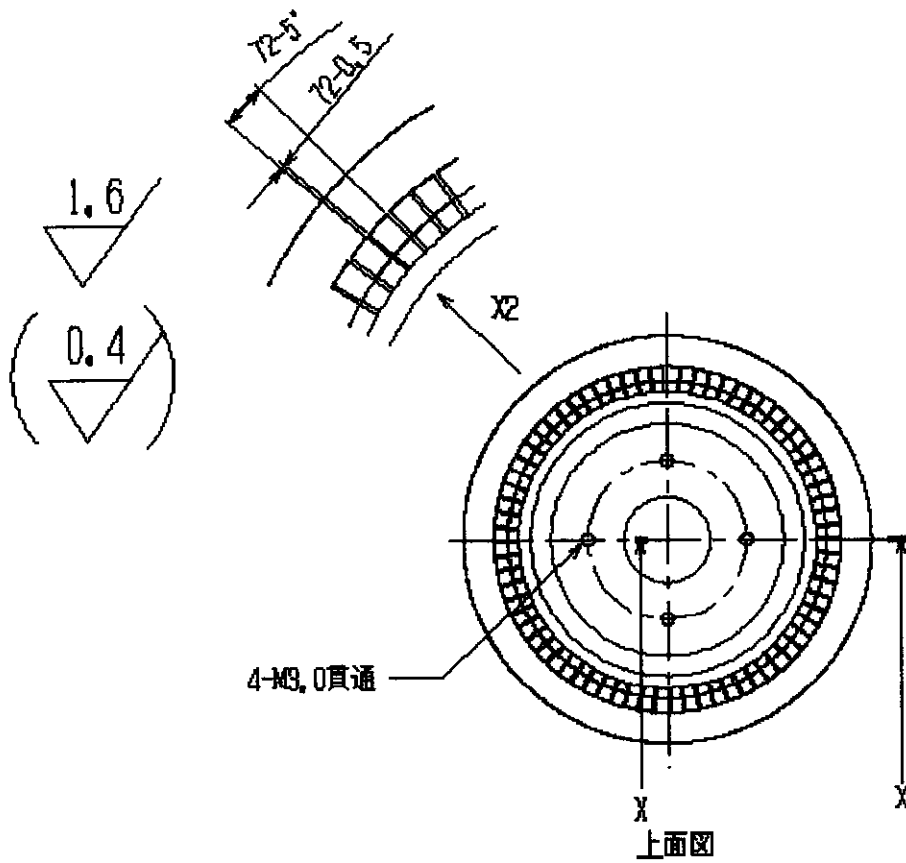
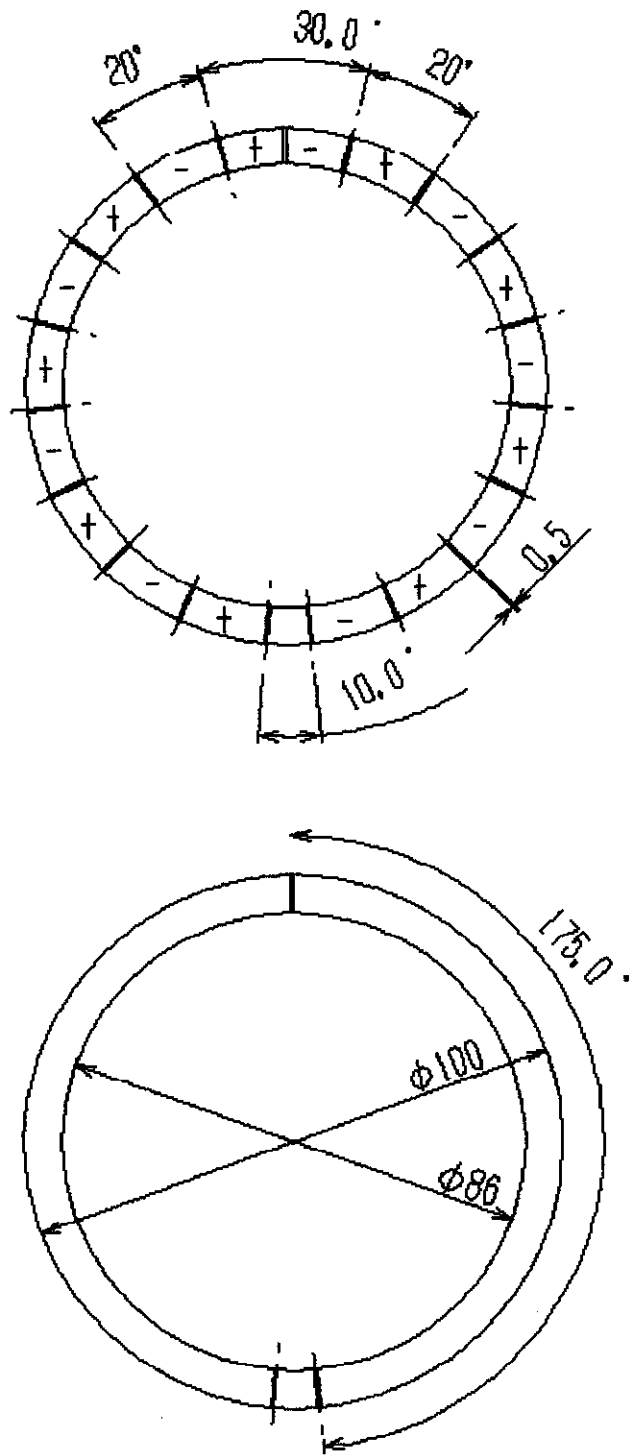


図 3・3 実験に使用したステータ



- 注1) B面ニバリ・切削痕ノナキコト
- 注2) 指示無キ直角コーナハイト面取りノコト

図 3・4 実験に使用したステータの設計図



注: 厚さ0,3[mm]

図 3・5 圧電素子の設計図

3.2 超音波モータ駆動システム

実験に使用する超音波モータ駆動システムを図 3.6 に示す。

超音波モータの位置 $\theta(k)$ をロータリーエンコーダにより検出し、指令位置角との誤差 $e(k)$ の情報を用いて制御入力を計算する。計算された入力を GP - IB を通して波形発生器に入力し、発生器の位相及び周波数を調整し超音波モータの制御を行う。

コンピュータ内の計算アルゴリズムは、C++言語を用いた。

またロータリーエンコーダの分解能は 512[P/R]であるが、カウンタボードのカウント入力入力逡倍を 4 倍に設定したことで 2048[P/R]の分解能をを実現し、0.176[deg./P]の位置角の分解能を実現できる。

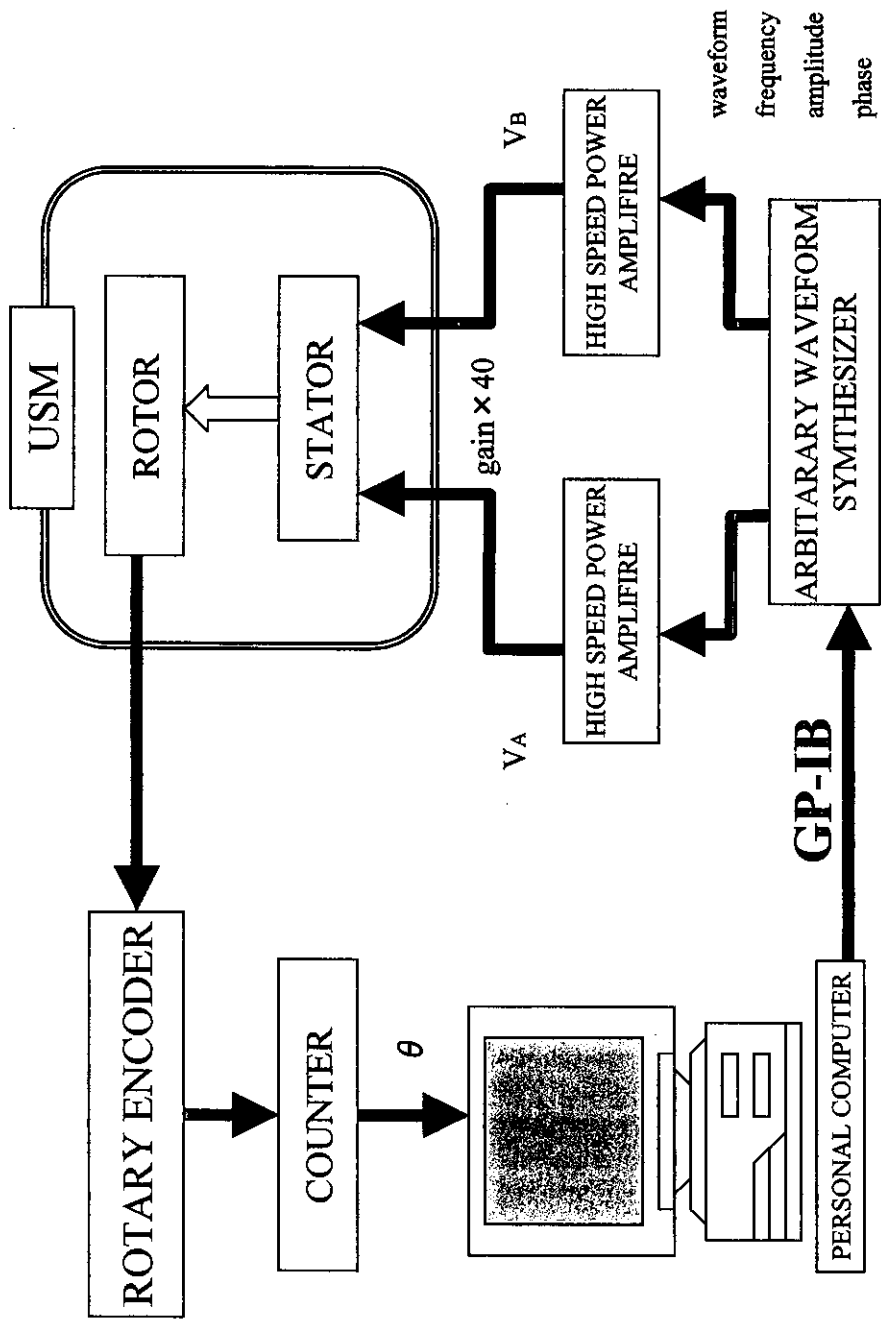


図3.6 USM制御機械系構成図

C. 研究結果

4.1 基本特性

超音波モータを構成ので高精度に制御するには、駆動条件の変化による特性変動を把握する必要がある。定在波の特性を決定する要素は周波数、電圧、位相差であることが確認される。よって本項では駆動周波数一回転速度特性、印加電圧一回転速度特性および印加電圧位相差一回転速度特性を明らかにし、超音波モータの制御を行う際の問題点について述べる。また今回の実験では押し付け力は85.5[kgf]一定とした。

駆動周波数一回転速度特性

印加電圧の位相差を90.0[deg.]一定とし、駆動周波数を変化した場合の回転速度特性の実験結果を図4.1、図4.2に示す。

図4.1は駆動周波数を33.30[kHz]より増加させた場合、図4.2は駆動周波数を33.90[kHz]より減少させていった場合の特性を示している。図4.1、4.2をまとめたものを図4.3に示す。

図4.3より超音波モータは駆動周波数に対してヒステリシス特性を持つことがわかる。

超音波モータは連続回転を行う間に損失されたエネルギーが熱となってステータの温度を上昇させる。周波数が支配する角速度 ω はステータのヤング率によって決定されるが、材質のヤング率は温度変化によって変化し、つまり、稼動前にステータの破棄しうる最大効率の共振転へ周波数を設定しておいても、連続運転を行う間に共振転が移動してしまい一定の出力が得られないという問題が起こることを示している。これを解決するためには移動する共振転を自動的に追尾する方式が考えられるが、たとえこのような補完を行ったにしても図4.3からもわかるように、周波数による変化は最大値の前後において非対称であり、さらにヒステリシス特性も持つためパラメータには適さないことがわかる。

よってヒステリシス特性やその他の特性の変化によるモータの停止を避けるためには、駆動周波数を 33.50~33.60[kHz] 近辺に固定して設定する必要がある。

印加電圧一回転速度特性

次に駆動周波数を 33.50, 33.60[kHz] とした場合の印加電圧に対する回転速度特性の実験を行った。その結果を図 4.4 に示す。同図より超音波モータは印加電圧に対し低速領域で不感帯を有していること、また回転速度に対して変化に統一性が乏しい上に変化率が小さいことがわかる。

これより印加電圧は超音波モータの制御を行う際にパラメータとして不適であることがわかる。

印加電圧位相差一回転速度特性

駆動周波数を 33.50, 33.60[kHz] とし、加電圧位相差に対する回転速度特性の実験を行った。その結果を図 4.5 に示す。同図より超音波モータの特性は印加電圧位相差に対して非線型の特性を有していることがわかる。よって印加電圧の位相差を変化することで超音波モータが連続的に正回転、逆回転、静止できることがわかる。

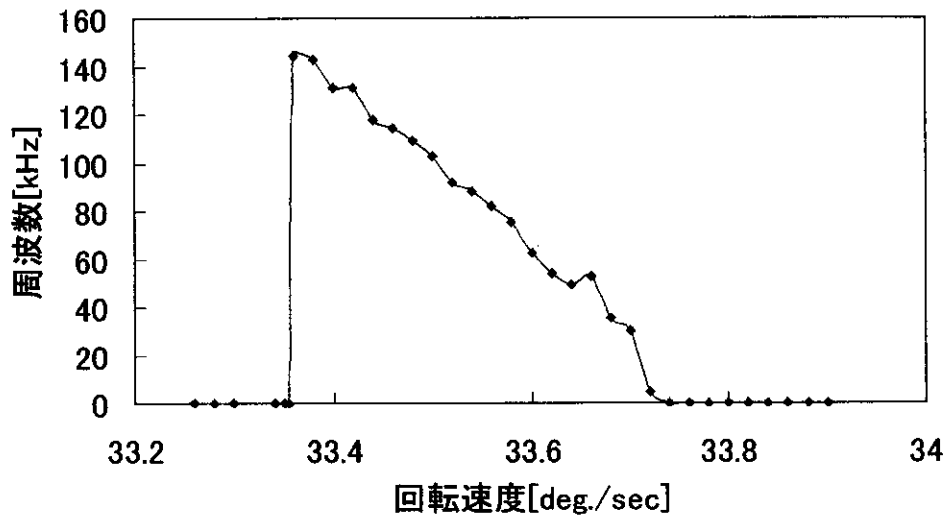


図 4.1 駆動周波数特性<行き>

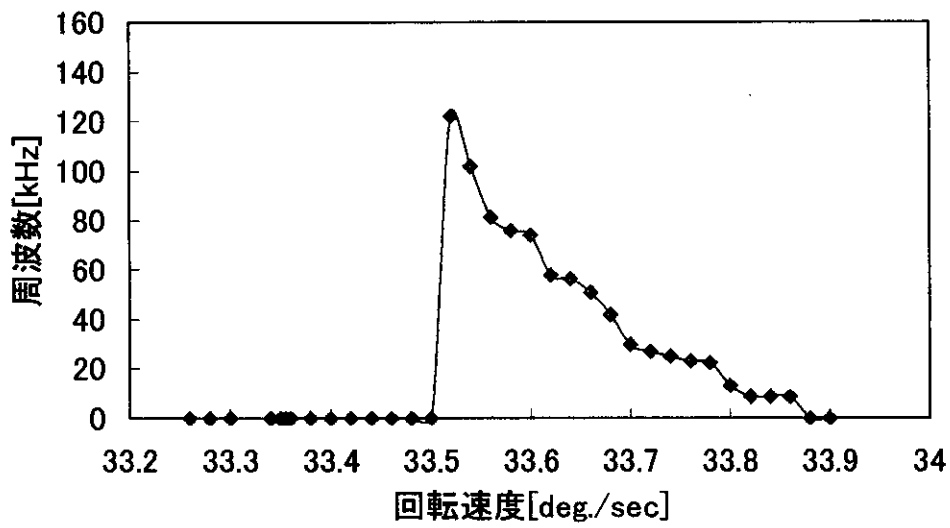


図 4.2 駆動周波数特性<帰り>

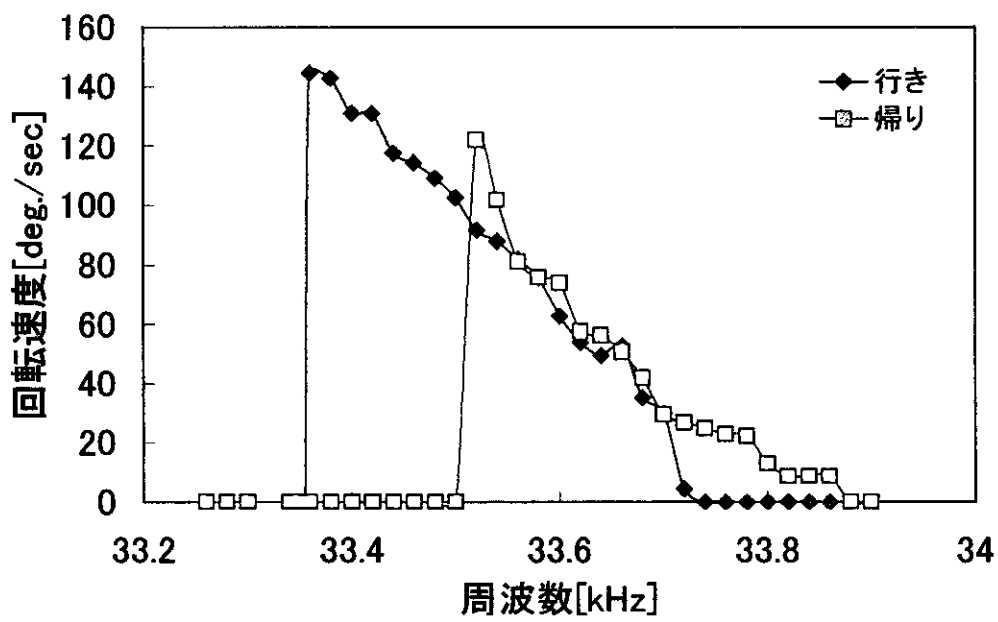


図 4.3 駆動周波数一回転速度特性

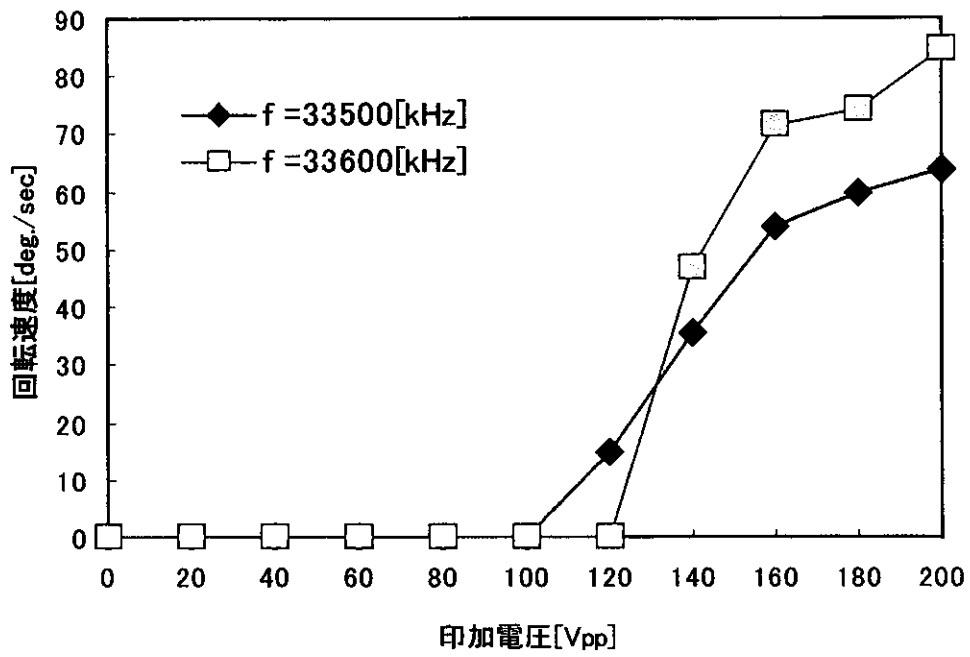


図 4.4 印加電圧—回転速度特性

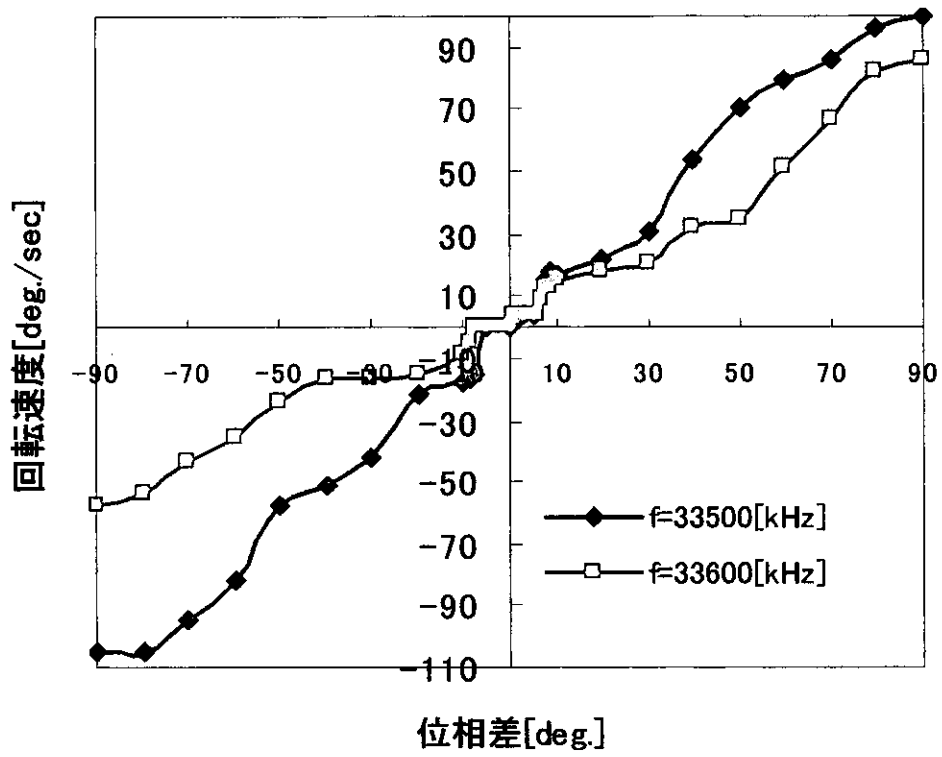


図 4.5 位相差—回転速度特性

4.2 制御パラメータの選定

以上より、印加電圧位相差制御法は制御面の面から超音波モータの位置制御に最も適しているといえる。

よって本論文では印加電圧位相差の制御範囲を

$$\bullet -90 \leq \phi \leq 90 [\text{deg.}]$$

(ただし ± 10 [deg.] の範囲は回転速度が急に变化しやすいことから、

$$|\phi| \leq 5 \quad \text{は } \phi = 0,$$

$$5 < \phi \leq 10 \quad \text{は } \phi = 10,$$

$$-10 \leq \phi < -5 \quad \text{は } \phi = -10, \text{ といった条件をつける)$$

・周波数は、33.60 [kHz] を使用

・押し付け力は 85.5 [kgf] 一定

として制御を行った。

また GP-IB の転送速度より、最小のサンプリング周期は

$$\bullet \theta = 0.06 [\text{sec}]$$

とする。

4.3 制御システムの構成

以上のことをふまえて、実際に位置制御と速度制御の制御システムを構成する。作成したシステムを図 4.6, 4.7 に示す。

位置制御、速度制御とも P 動作を基本とし、I, D 動作は実験を行い必要であれば組み込むこととする。