

図 4.6 速度制御システム

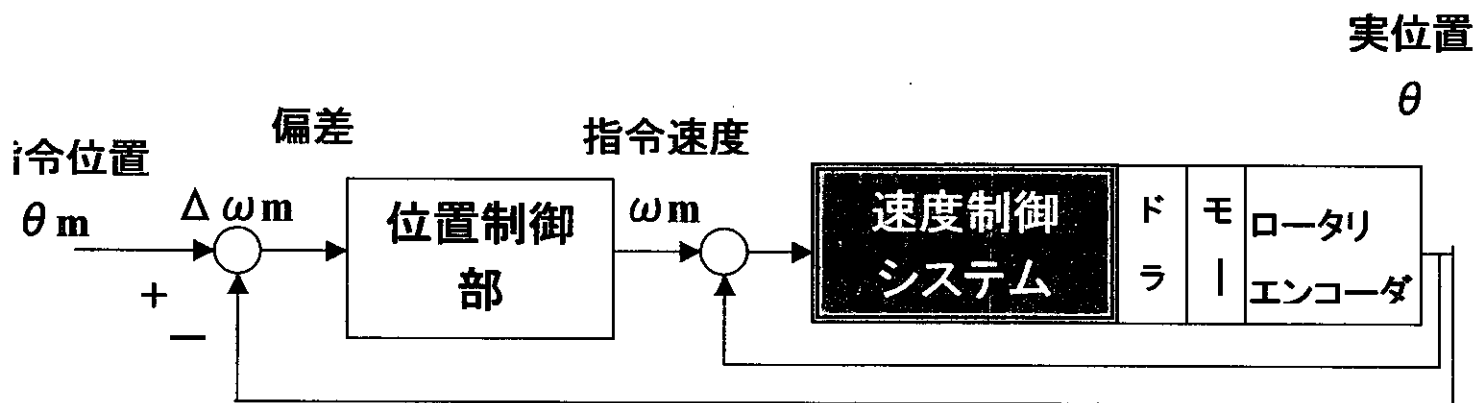


図 4.7 位置制御システム

4.4 速度制御実験

超音波モータの速度制御実験を行った。

最適調整を行うために、P動作のみの制御を行った。しかし $K=1$ で実験開始直後に振動をはじめ不安定な状態になってしまった。超音波モータを駆動する際、 K の最小値 $K=0.1$ (これ以上小さくすると、立上りに非常に時間がかかる)としても不安定な振動は収まらなかったため、原因を考えることにした。

そこでまず制御をかけずに、位相差 $\phi=90[\text{deg.}]$ として駆動した。

その結果を図4.8に示す。同図より、無制御時において超音波モータは回転ムラを起こしながら一定の周期をもって振動し回転していることがわかる。この原因として考えられるのは、ロータとステータの接触状態にあると考えられる。動力の伝達は、ステータの歯の先端がロータに食い込込むことにより伝達されている。しかしステータはその円周上においてロータとの片当たりや、圧電素子自体の出力ムラ等によって駆動力をよく伝達できる点とできない点が混在しており、それにより回転ムラを起こしていると考えられる。しかし、ある点で回転が決まって停止してしまうということではなく、これは駆動力を良く伝達する点(これを良点と呼ぶ)が、伝達の悪い点(これを悪点と呼ぶ)の出力を補っているためと考えられる。図4.9は時間と位置の関係のグラフであるが、これよりも良点が悪点の出力を補っているため、一定の出力を得ていることがわかる。また回転ムラを起こすもう一つの原因として考えられるのは、一つのロータを二つのステータではさむという構造にある。サンドイッチ構造にしたことでロータの材質・厚さによりステータの振動がロータを介して反対側のステータに伝達されてしまい、モータの回転が不安定になりやすくなる。さらにそれぞれのステータに貼られている圧電素子の厚さ・接着状態によって共振点が微妙にずれ、そのため出力の低いほうのステータが高いほうのステータの負荷になってしまうという原因が考えられる。これについては同研究室でも報告されている。これらのことより、制御を行う際のパラメータである位相差から一定の出力が得にくいことがわかる。よって精密な速度制御をするためには与えられたパラメータに対して一定の出力を得られるよう、ハード的な面での改良が必要である。よって速度制御の目標を、超

音波モータ駆動の際の速度の振動を押さえることに重点をおき最適調整を行うこととする。
 位相差による振動をできるだけ押さえるため、式(2.7)を以下の様に変形して用いる。

$$y = 0.8 \times v_0 + K \left(e_n + \frac{\theta}{2T_I} \sum (e_n + e_{n-1}) + \frac{T_D}{\theta} (e_n - e_{n-1}) \right) \quad (4.1)$$

式(4.1)の右辺第1項は、図より、 $f=33.60$ [kHz]の時の位相差と回転速度の関係を線形化して用いた。この関係を用いることにより不必要な振動を防ぐことができると考えられる。

最適調整

以上の点をふまえて最適調整を行う。

制御実験を行い、トライアルして各最適値を求める。

実験の結果、拡張限界感度法を参考にし、次の値を最適値として採用した。

表 4.1 最適値

サンプリング周期 θ [sec]	K	T_I	T_D
0.06	0.027	0.144	0.0792

表 4.1 の値を用いて目標速度を 80[deg./sec], 60[deg./sec], 40[deg./sec], 20[deg./sec]とし速度制御を行った結果を図 4.10-1, 4.11-1, 4.12-1, 4.13-1 に示す。それぞれの目標速度について、無制御の際の結果も図 4.10-2, 4.11-2, 4.12-2, 4.13-2 に示す。

また同図について、時間 - 位置のグラフを図 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 に示す。

また式(2.8)

$$I_e = \int e^2 dt \quad (2.8)$$

を用いて、各場合について評価を行う。

考察

まず各グラフより，評価関数を求める．

また各値はデータの個数が違うため，値をデータ数で割ったものを使用している．

表 4.2 評価関数

目標速度 [deg./sec]	80	60	40	20
制御時 I_1	349	214	306	92
無制御時 I_2	461	280	299	97
$\frac{I_1}{I_2}$	0.76	0.77	1.02	0.95

表 4.2 より，目標速度が 80, 60[deg./sec]の時について，振動が約 25%おさえられていることがわかる．図 4.14, 4.15 の $v-t$ グラフよりも，ほぼ正確に目標速度を達成していることがわかる．しかし目標速度が 40, 20[deg./sec]の時については，無制御の時とあまり違いは見られなかった．これは図 4.5 の位相差 - 回転速度特性のグラフより，位相差が小さ範囲では位相差に対する応答が不安定であることと，式(5.1)で使用した線形化が適用されない範囲であったこととがあげられる．

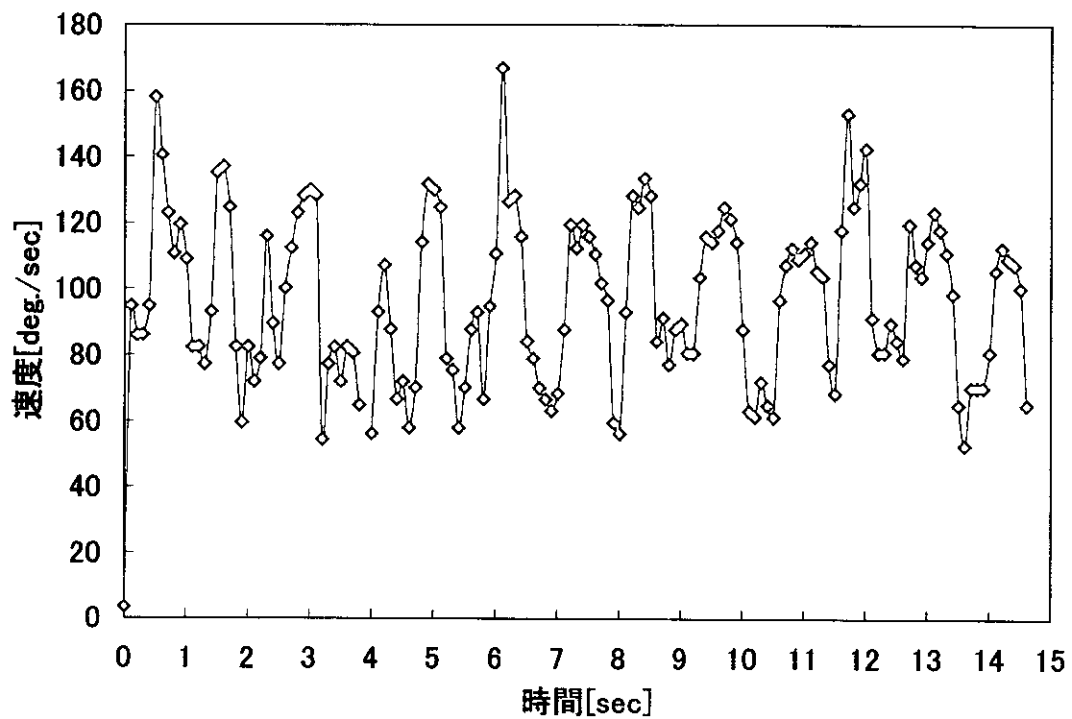


図 4.8 無制御<位相差 $\phi = 90^\circ$ >

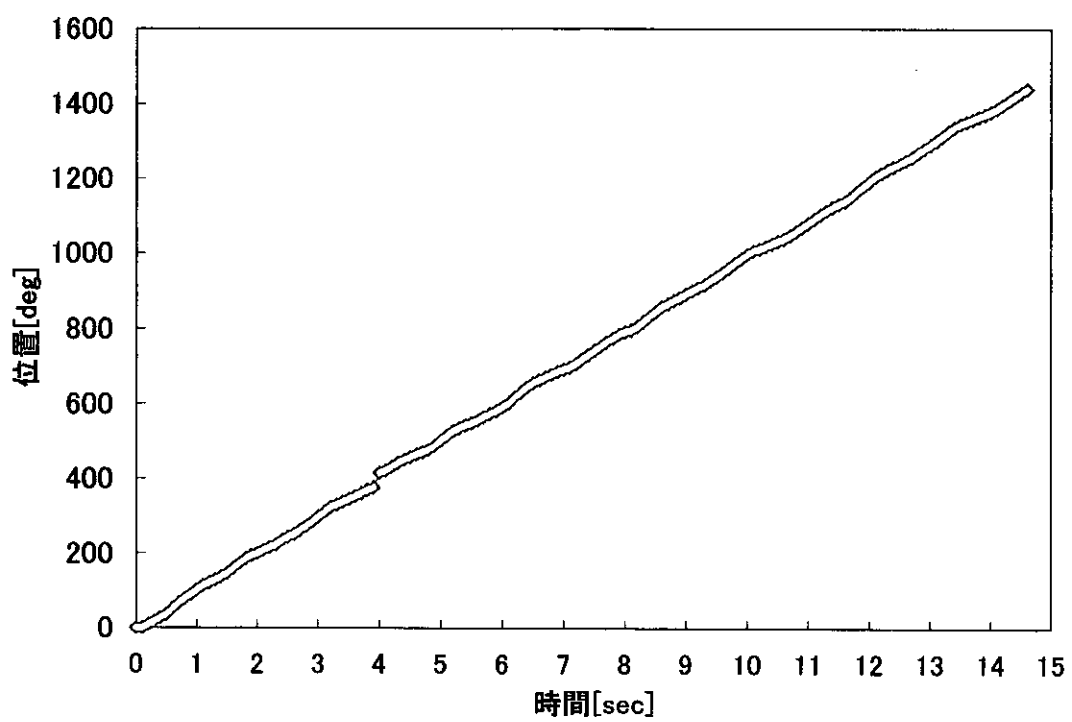


図 4.9 v-t グラフ< $\phi=90^\circ$ >

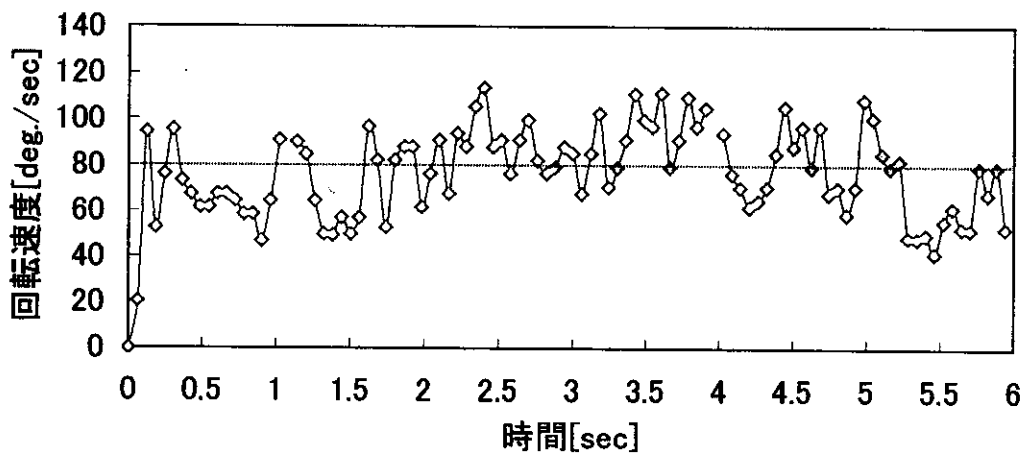


図 4.10-1 速度制御結果<目標速度 80[deg./sec]>

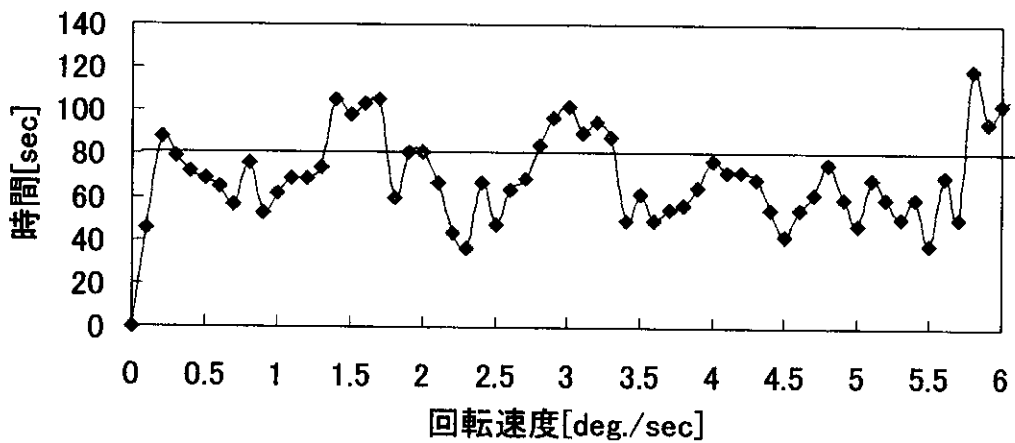


図 4.10-2 無制御<速度 80[deg./sec]>

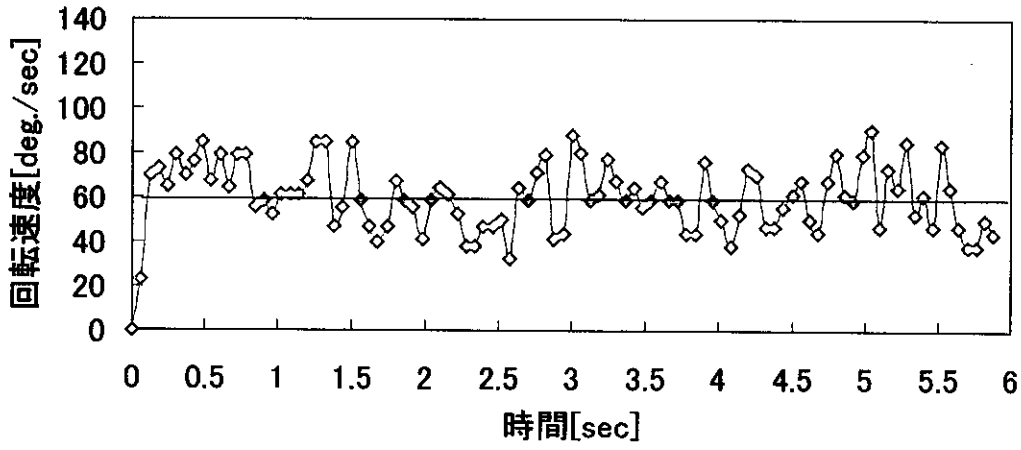


図 4.11-1 速度制御結果<目標速度 60[deg./sec]>

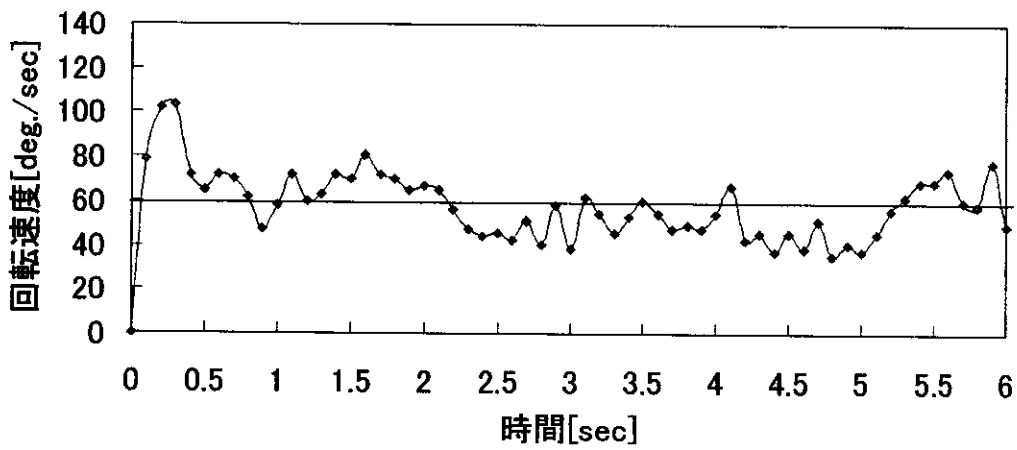


図 4.11-2 無制御<速度 60[deg./sec]>

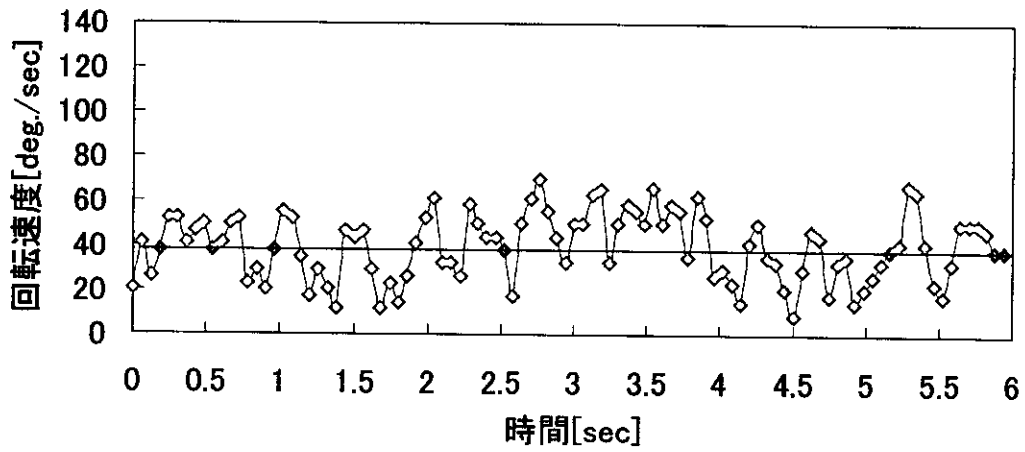


図 4.12-1 速度制御結果<目標速度 40[deg./sec]>

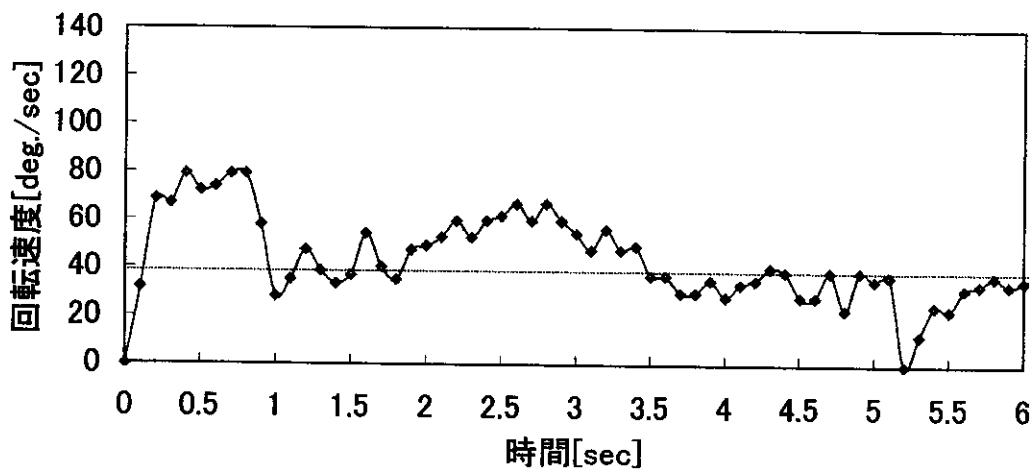


図 4.12-2 無制御<速度 40[deg./sec]>

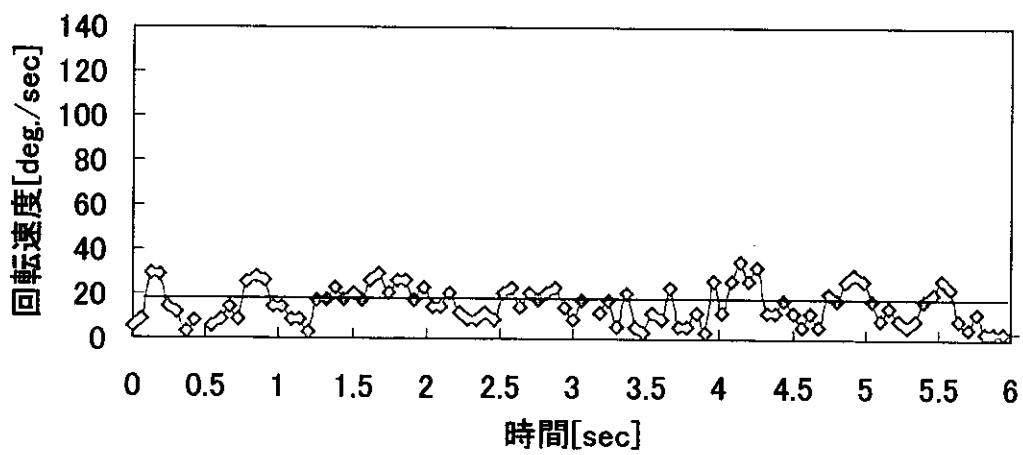


図 4.13-1 速度制御結果<目標速度 20[deg./sec]>

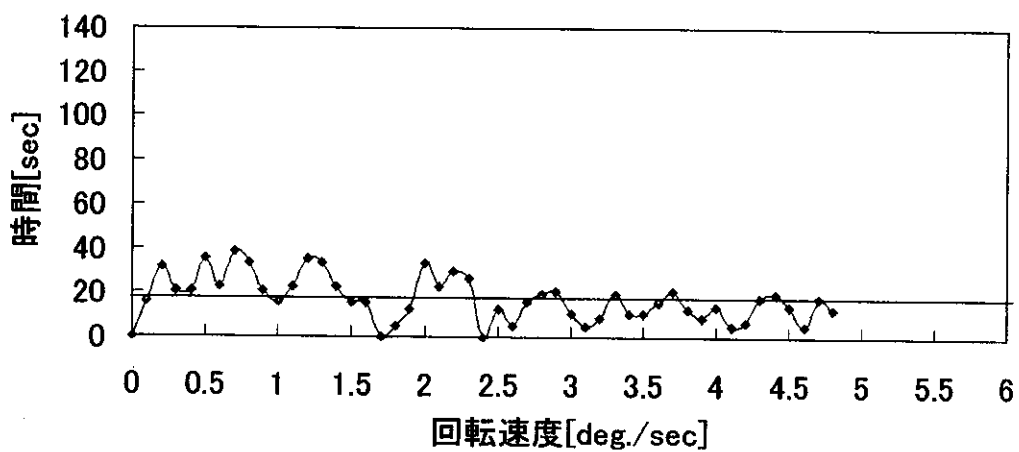


図 4.13-2 無制御<速度 20[deg./sec]>

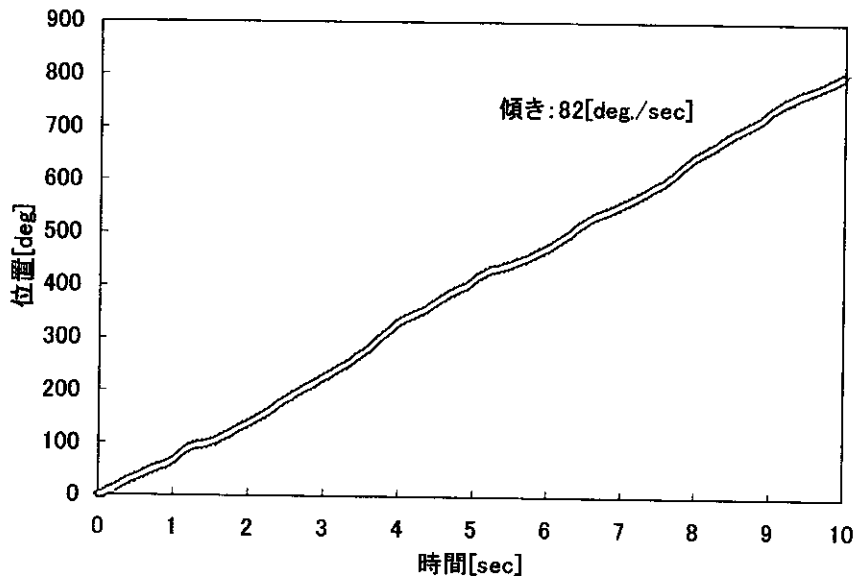


図 4.14 v-t グラフ<目標速度 80[deg./sec]>

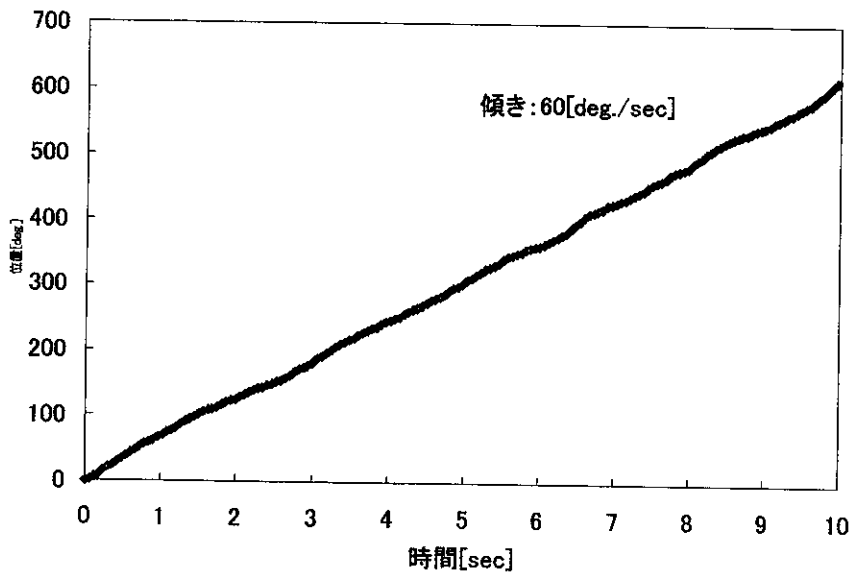


図 4.15 v-t グラフ<目標速度 60[deg./sec]>

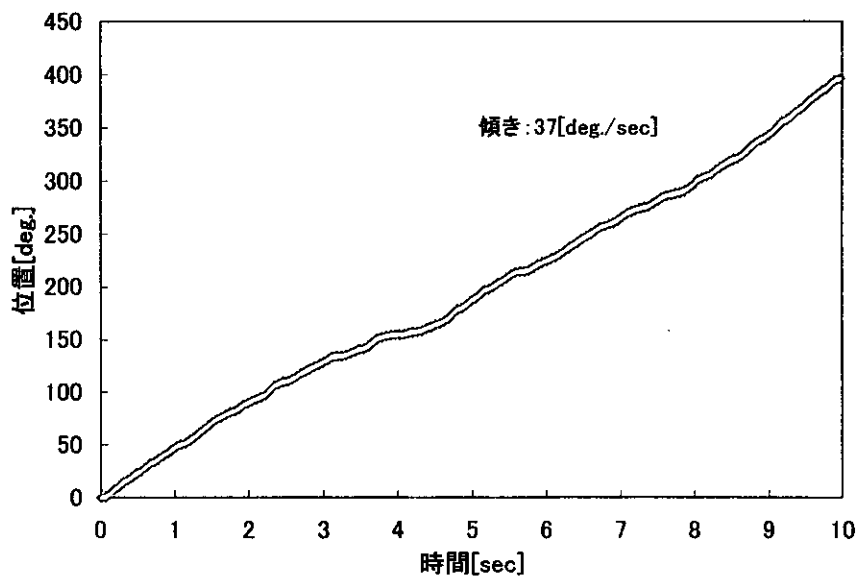


図 4.16 v-t グラフ<目標速度 40[deg./sec]>

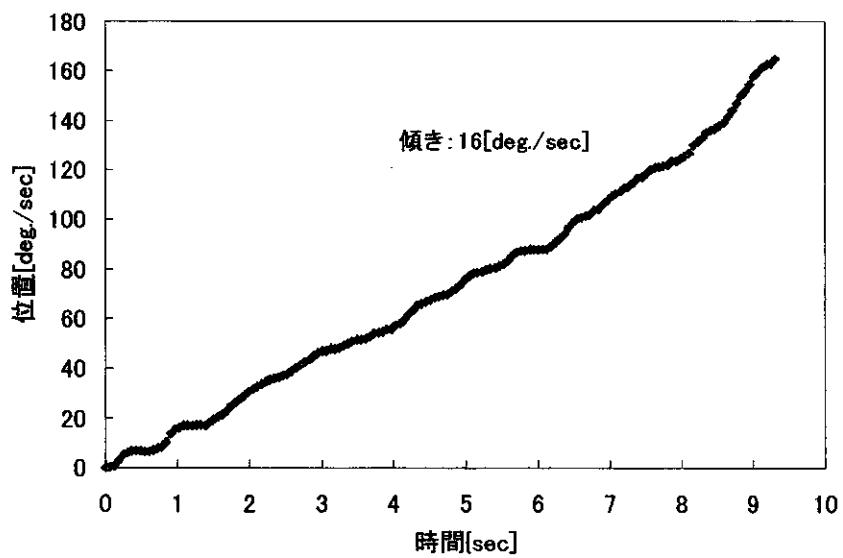


図 4.17 v-t グラフ<目標速度 20[deg./sec]>

4.5 位置制御実験

速度制御と同様に、超音波モータの位置速度制御実験を行った。

最適調整を行うために、目標位置を $90[\text{deg.}]$ 、駆動周波数 $f=33.60[\text{kHz}]$ とし P 動作のみの制御を行った。その結果を図 4.18 に示す。実験の結果 $K=2.5$ で振動をはじめ、 $K=3$ を過ぎたあたりから振動し始めた。

(発散ないのは位相差に $|\phi| \leq 90[\text{deg.}]$ という拘束条件をかけているため)。よって限界感度 $K_u=2.5$ 、限界周期 $T_u=2[\text{sec}]$ とし最適調整を行う。また位置制御では P 動作で十分な結果を得ることができたので、PI 動作のみで制御を行い D 動作は使用しなかった。

図 4.19, 4.20 に、目標回転角度を $10, 45[\text{deg.}]$ とした時の制御結果を示す。これは P 動作のみだが、 K が小さい値の時には十分な結果を得ている。

最適調整

これらの結果より、最適値を求める。

また制御グレードは $G=1.05$ と、 $G=1.2$ について実験を行った。

表 4.3 最適値

制御グレード G	θ	K_p	T_i
1.05	0.06	1.325	1.76
1.2	0.10	1.225	1.82

各実験の結果を図 4.21 に示す。

考察

表 4.4 結果

	応答速度[sec]	オフセット[deg.]
$G=1.05$	5.5	0.65
$G=1.2$	7.3	1.32
P 動作のみ	—	平均 3.3

表 4.4 より制御グレードを下げることで、応答速度が速くなり、オフセットも小さくなり、良い制御成績を得られた。

またオフセットは P 動作のみの平均値 3.3[deg.] に対し、 $G=1.2$ が 1.32[deg.]、 $G=1.05$ が 0.65[deg.]であり、I 動作を入れたことによりオフセットを小さくできている。

しかし、I 動作を行ってもオフセットがゼロにならなかった。原因として、制御を行う際に位相差の小さい範囲に対して拘束条件を与えていることが考えられる。これにより微少な移動を行えないことが原因のひとつとして挙げられる。

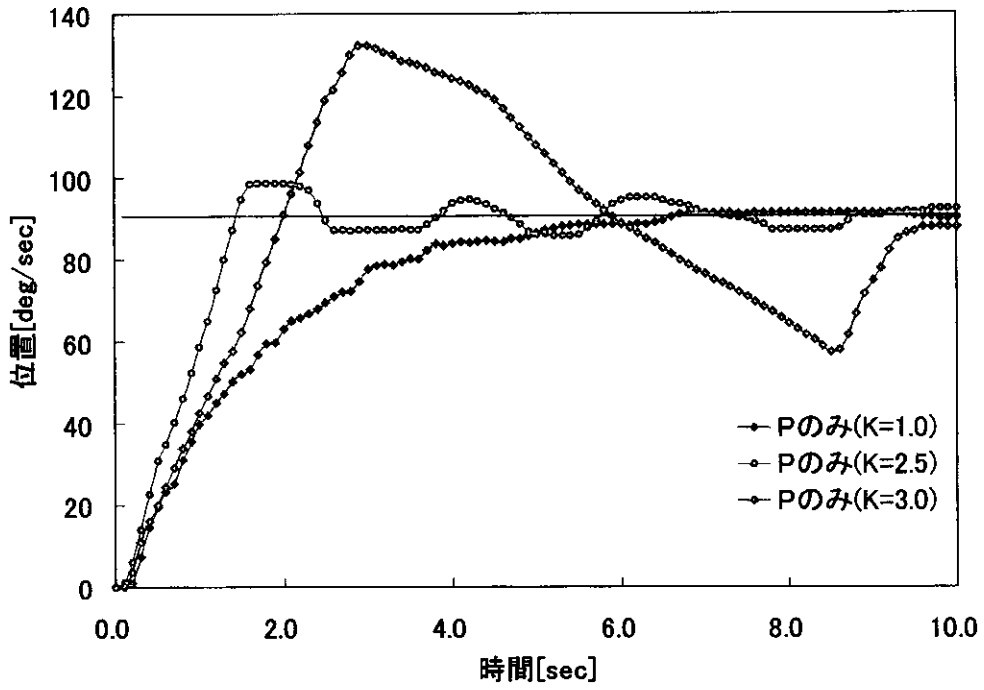


図 4.18 位置制御結果 <目標回転角 90[deg]>

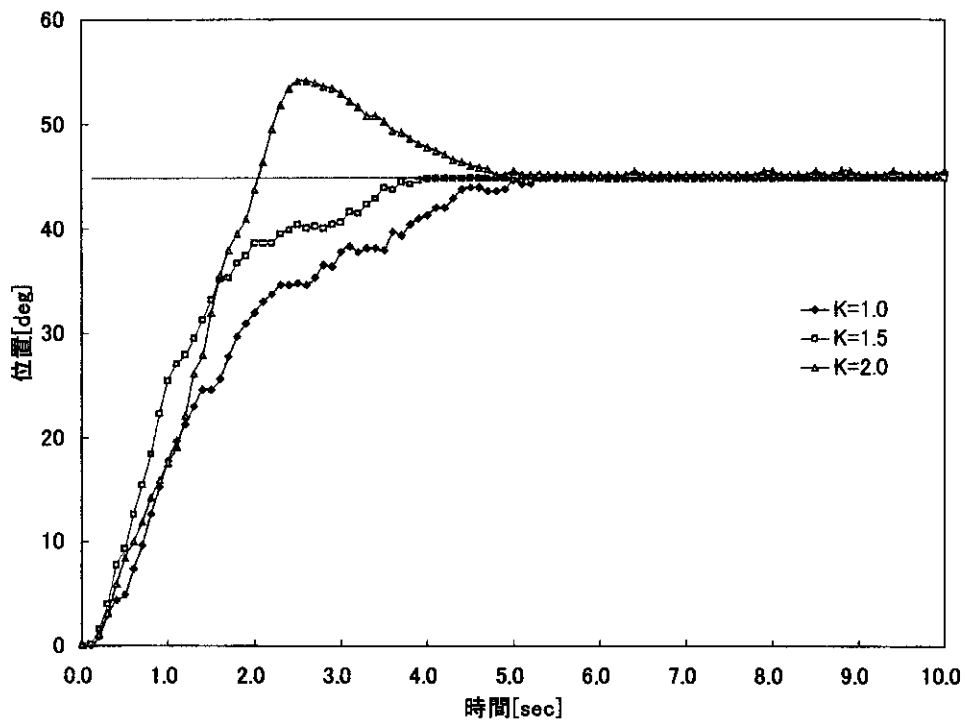


図 4.19 位置制御結果 <目標回転角 45[deg]>

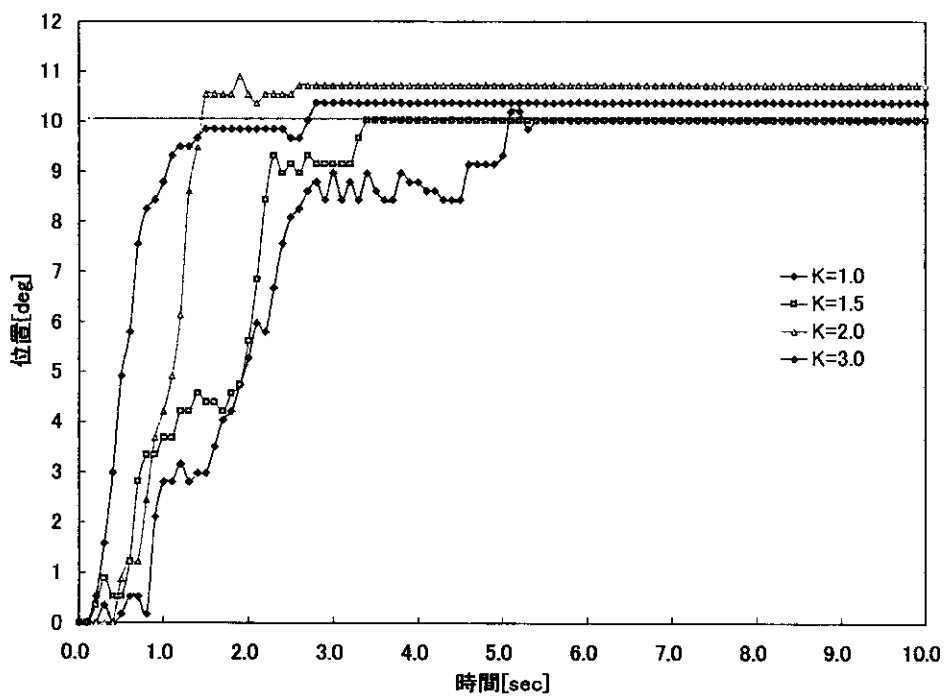


図 4.20 位置制御結果 <目標回転角 10[deg]>

D. 結論

本研究では PID 制御器を用いてサンドイッチ型超音波モータの位置・速度制御を行った。超音波モータの基本特性を調べ、位置・速度制御を行う際の問題点を明らかにした。そしてその問題点を解決するために PID 制御器を用いた制御システムを構築し、実験によりその有効性を確認した。以下に得られた結果を示す。

[1] 音波モータの速度制御を行い、PID 制御器が速度のばらつきを押さえるのに有効であることがわかった。

[2] 超音波モータの位置制御を行い、その最適制御を行った。最適調整法では拡張限界感度法を用い、その最適化が有効であることが確かめられた。最終的に角度偏差 $0.65[\text{deg.}]$ を得た。

今後の課題として、さらに精密な速度・位置制御を行うためには、

- ・ステータ 1 枚の平面型の超音波モータで制御を行い、サンドイッチ型にしたことによる制御への影響を検討する。

- ・超音波モータ自身が与えられたパラメータに対し、安定した出力を出せるようにハード的な面における改善が必要。

- ・現在の実験器の問題点を検討し、改良を加える。具体的には、ロータリーエンコーダの分解能を高いものにし、カウンターボード、GP-IB の処理速度を高める。

・印加電圧位相差以外のパラメータ，特に駆動周波数に目を向け，補償法を検討する。
等があげられる。

厚生科学研究補助金（長寿科学総合研究所）

分担研究報告書

安全センサーの開発に関する研究

研究者 梅田 倫弘 東京農工大学工学部助教授

研究要旨

進行波型超音波モータは、弾性体裏面に圧電素子を貼りつけた振動子（ステータ）と、回転子（ロータ）からなる。この圧電素子に交流電圧を印加する事で力を発生させ、ステータを共振状態にすることでその表面に進行波を生成する。印加電圧周波数と共振周波数はなるべく近い値が望ましい。印加電圧周波数が共振周波数から大きく外れると、モータのトルク、回転数は低下してしまう。ところが、このステータの共振周波数は、ステータ・ロータ間の押付け力やステータの温度により変化する。そこで本研究では、押付け力や温度が変化しても常に印加電圧周波数が共振周波数に追従するよう制御する方法として、周波数走査による最大フィードバック電圧検出法を提案した。その結果、長時間駆動する事時にトルク、回転数を以前より安定して出力できるようになり、その有用性が示された。また、コントローラのパラメータを検討し、より安定かつ高速な追従を行うための指針を示した。また、印加電圧周波数を自動的に決定する事により、従来駆動する毎に行っていたドライバの調整が不要となり、利便性が向上した。超音波モータの制御を行う上で従来ネックとなっていた長時間駆動での安定性の問題が今回の研究で解消されたのを受け、今後は更なる制御性能の向上に繋げることが出来る。

A. 研究目的

進行波型超音波モータは、図 1.1 のように弾性体裏面に圧電素子を貼りつけた振動子（ステータ）と、回転子（ロータ）からなる。この圧電素子に交流電圧を印加する事で力を発生させ、ステータを共振状態にすることでその表面に進行波を生成する。この時、ステータ表面上の 1 点は楕円運動をしており、ロータとの摩擦力により出力を得る。印加電圧周波数と共振周波数はなるべく近い値が望ましい。印加電圧周波数が共振周波数から大きく外れると、モータのトルク、回転数は低下してしまう。ところが、このステータの共振周波数は、ステータ・ロータ間の押付け力やステータの温度により変化する。

超音波モータは摩擦駆動のアクチュエータであるから、ステータ・ロータ間の摩擦による温度上昇は不可避である。またステータ・ロータ間の接触状態は一様ではなく、ステータやロータの熱膨張もあって、押付け力も常時変化している。従って、共振周波数はモータの状態によって大きく変化する事になる。

そのため、一定の印加電圧周波数を与えるだけではモータの状態変化によって出力が変動し、長時間の安定駆動が出来ず、変位量や速度を制御する事も困難である。よって、印加電圧周波数を如何に弾性体の共振周波数に追従させるかが重要である。

そこで本研究では、押付け力や温度が変化しても常に印加電圧周波数が共振周波数に追従するよう制御する方法として、周波数走査による最大フィードバック電圧検出法を提案する。