

# 実験

## 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。超音波モータの駆動原理より、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－回転速度特性、印加電圧－回転速度特性および印加電圧位相差－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－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 5.1, 図 5.2 に示す。

図 5.1 は駆動周波数を 33.30[kHz]より増加させた場合、図 5.2 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 5.1, 5.2 をまとめたものを図 5.3 に示す。図 5.3 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 $\omega$ 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 5.3 からわかるように、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 5.4 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 5.5 に示す。同図より超音波モータの特性は印可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。

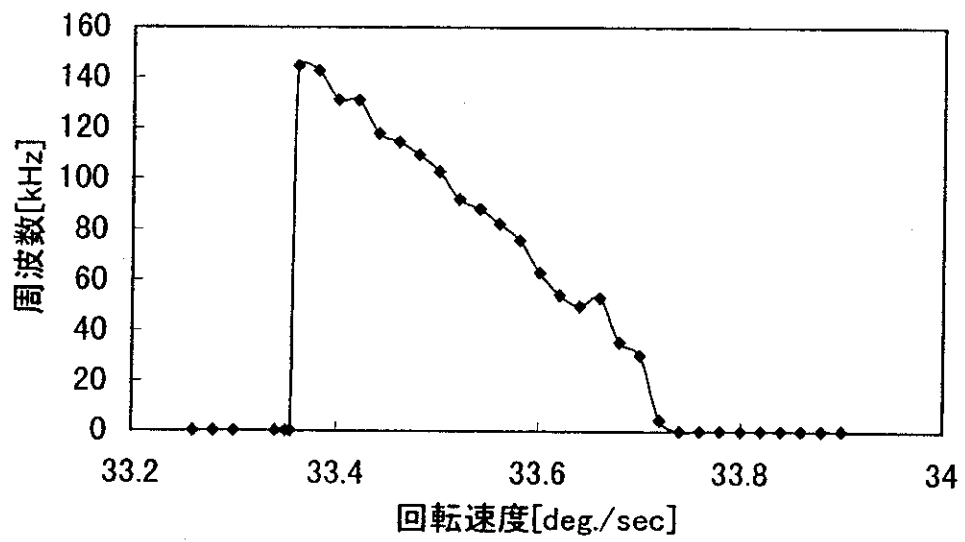


図 5.1 駆動周波数特性<行き>

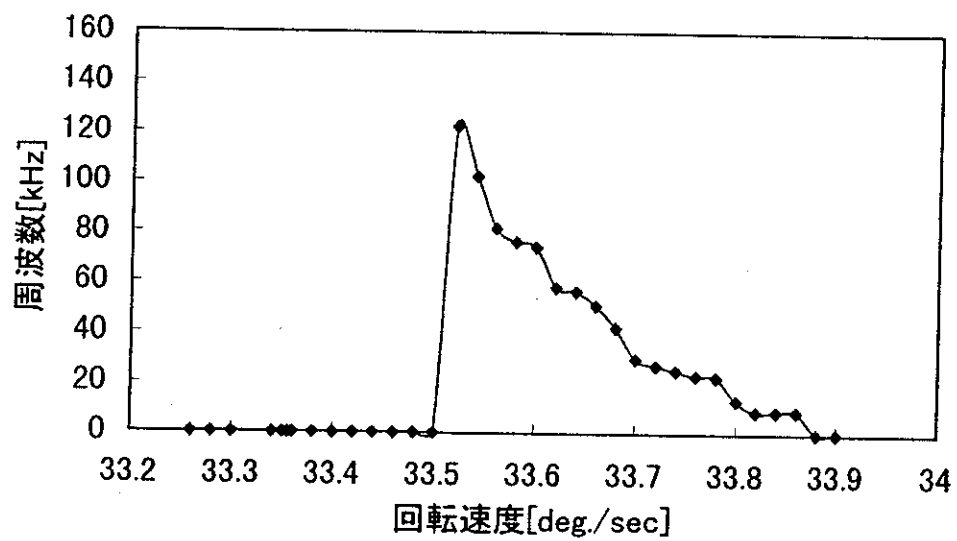


図 5.2 駆動周波数特性<帰り>

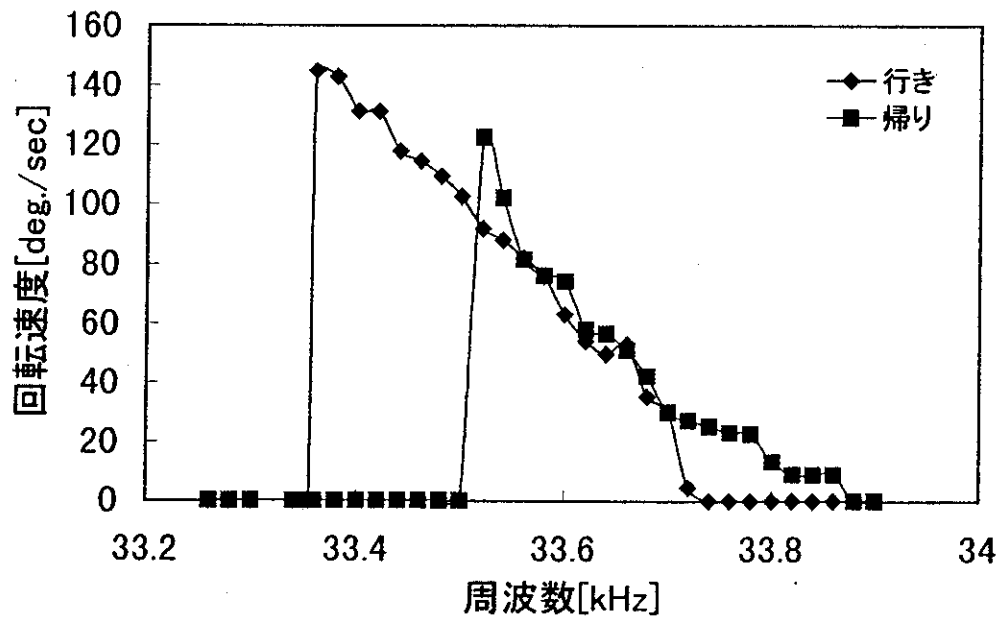


図 5.3 駆動周波数一回転速度特性

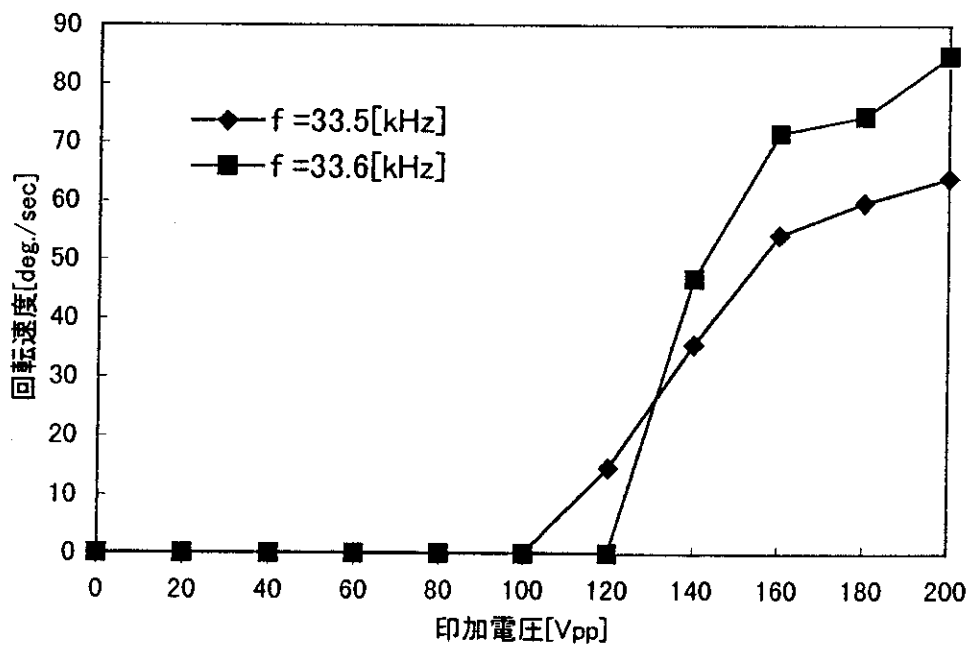


図 5.4 印加電圧一回転速度特性

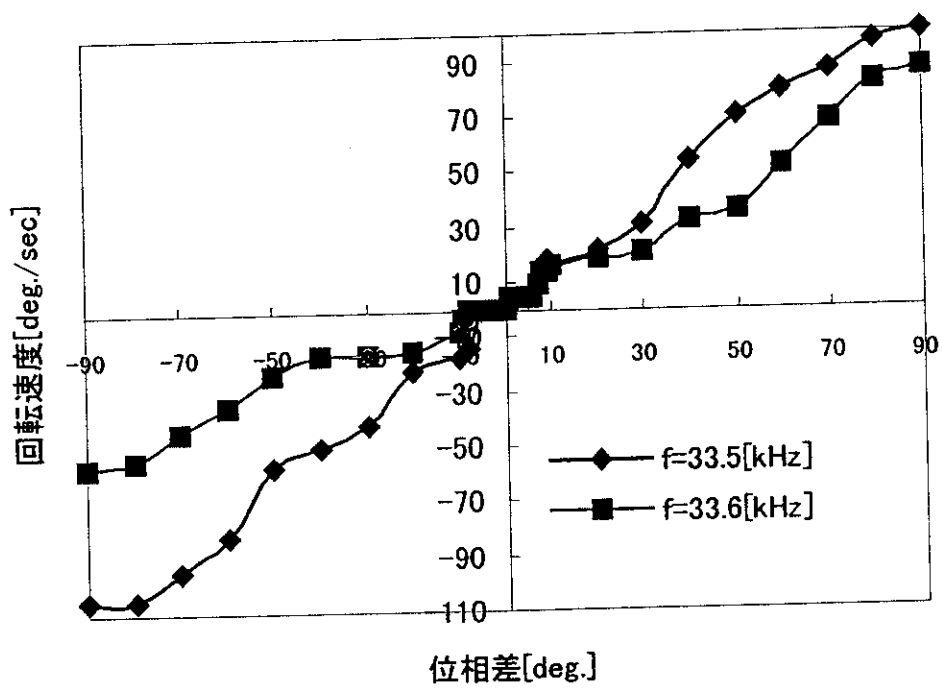


図 5.5 位相差—回転速度特性

## 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

- ・  $-90 \leq \phi \leq 90$ [deg.]

(ただし $\pm 10$ [deg.]の範囲は回転速度が急に変化しやすいことから、

$|\phi| \leq 5$  は $\phi = 0$ ,

$5 < \phi \leq 10$  は $\phi = 10$ ,

$-10 \leq \phi < -5$  は $\phi = -10$ , 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

- ・  $\theta = 0.06$ [sec]

とする。

## 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 5.6, 5.7 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。

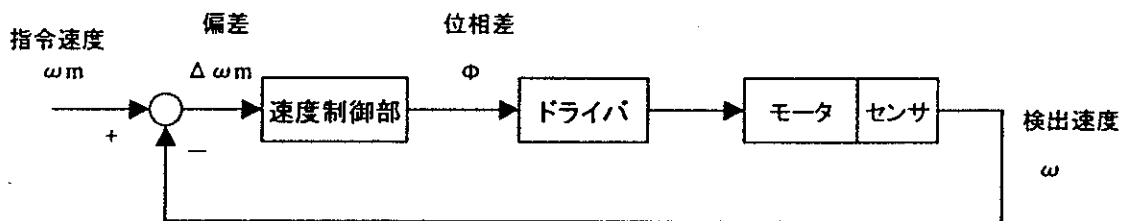


図 5.6 速度制御システム

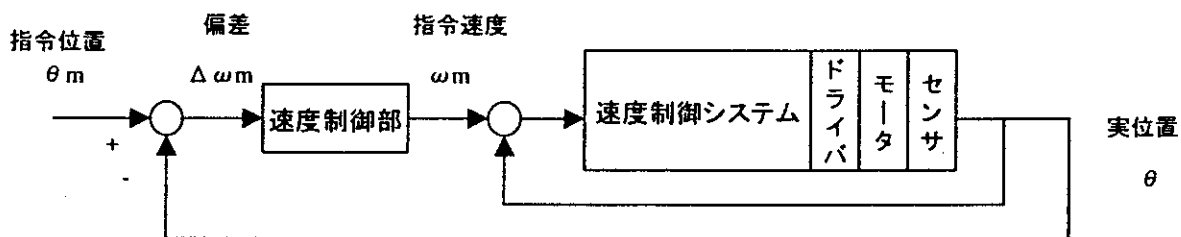


図 5.7 位置制御システム

## 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 $\phi=90$ [deg.]として駆動した。

その結果を図 5.8 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 5.9 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、第3章式(3.7)を以下の様に変形して用いる。

$$y = 0.8 \times v_0 + K \left( e_n + \frac{\theta}{2T_i} \sum (e_n + e_{n-1}) + \frac{T_D}{\theta} (e_n - e_{n-1}) \right) \quad (5.1)$$

式(5.1)の右辺第1項は、図より、 $f=33.60[\text{kHz}]$ 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 5.1 最適値

| サンプリング周期 $\theta$<br>[sec] | $K$   | $T_i$ | $T_D$  |
|----------------------------|-------|-------|--------|
| 0.06                       | 0.027 | 0.144 | 0.0792 |

表 5.1 の値を用いて目標速度を  $80[\text{deg./sec}]$ ,  $60[\text{deg./sec}]$ ,  $40[\text{deg./sec}]$ ,  $20[\text{deg./sec}]$  とし速度制御を行った結果を図 5.10-1, 5.11-1, 5.12-1, 5.13-1 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 5.10-2, 5.11-2, 5.12-2, 5.13-2 に示す。

また同図について、時間 - 位置のグラフを図 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 に示す。

また式(3.8)

$$I_e = \int_0^{\infty} e^2 dt \quad (3.8)$$

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 5.2 評価関数

| 目標速度<br>[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 5.2 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 5.14, 5.15 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 5.5 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があげられる。

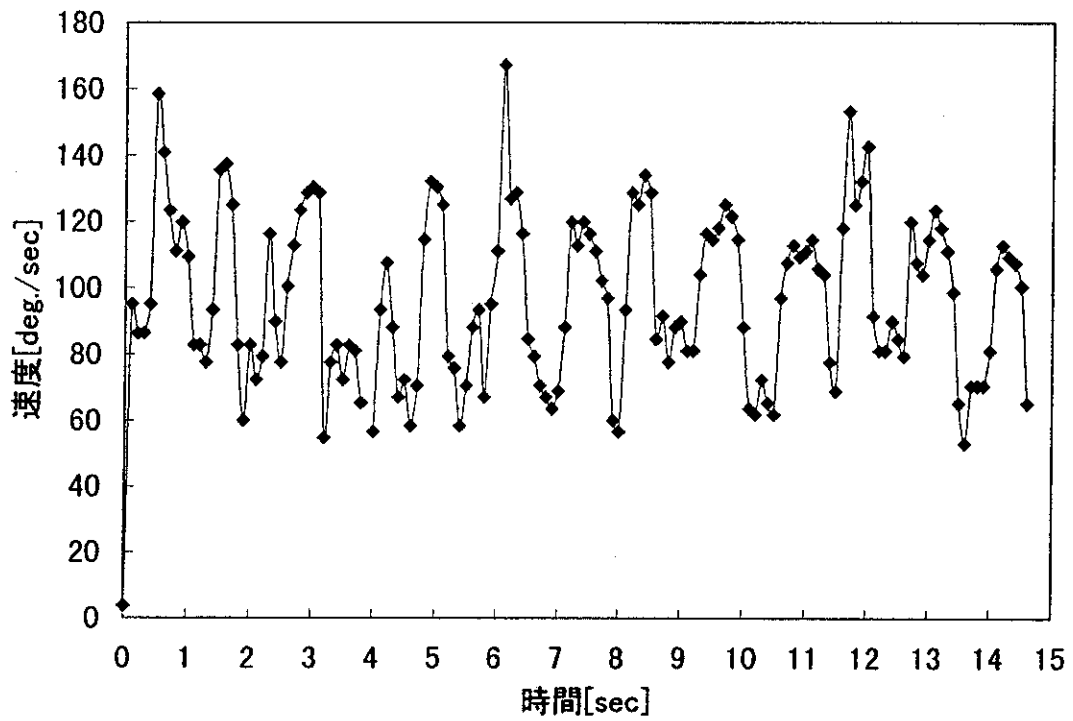


図 5.8 無制御<位相差 $\phi=90$ >

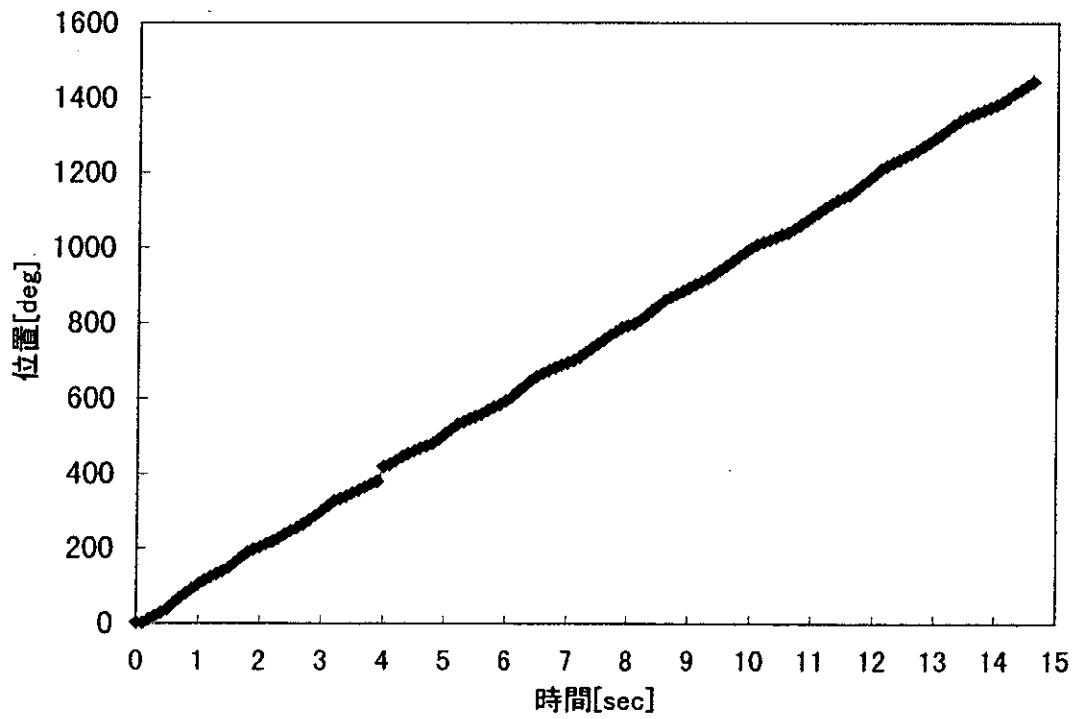


図 5.9 位置—時間グラフ< $\phi=90$ >

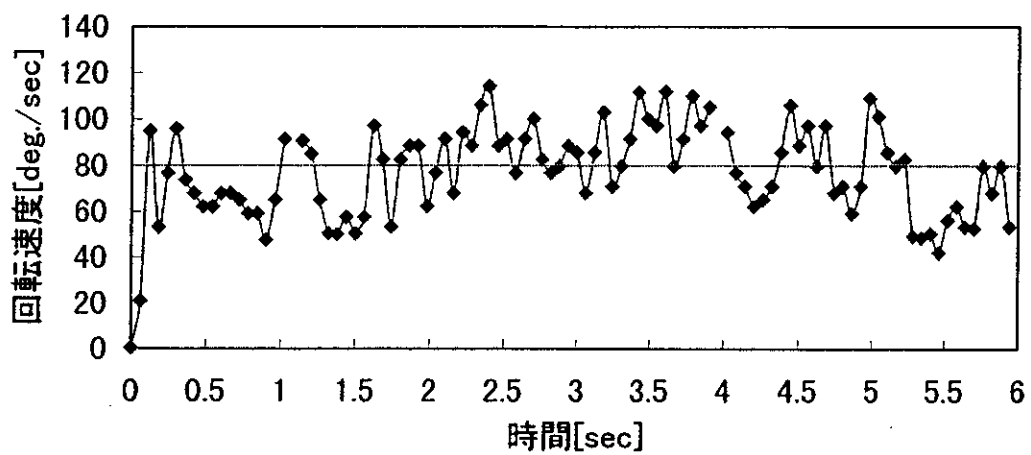


図 5.10-1 速度制御結果<目標速度 80[deg/sec]>

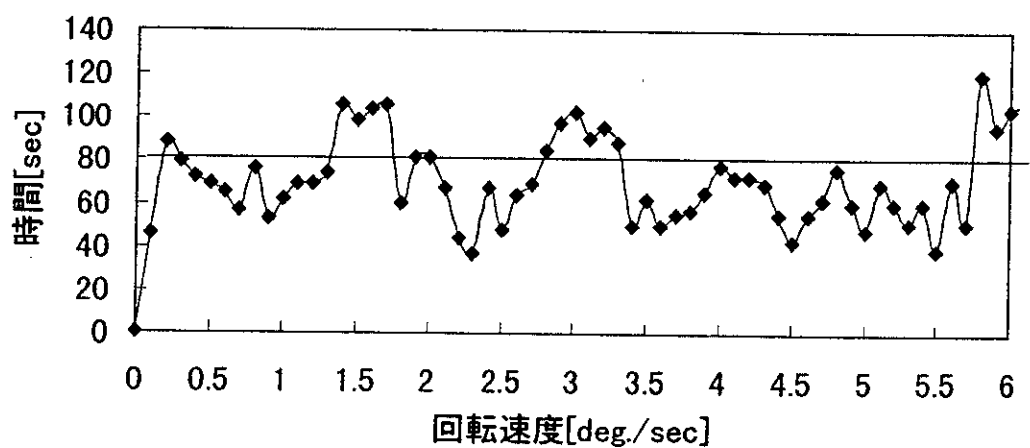


図 5.10-2 無制御<速度 80[deg/sec]>

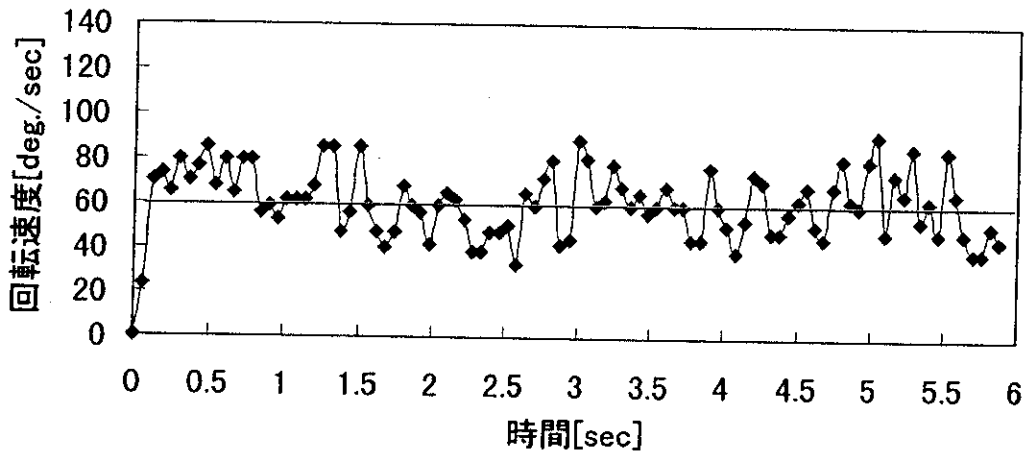


図 5.11-1 速度制御結果<目標速度 60[deg/sec]>

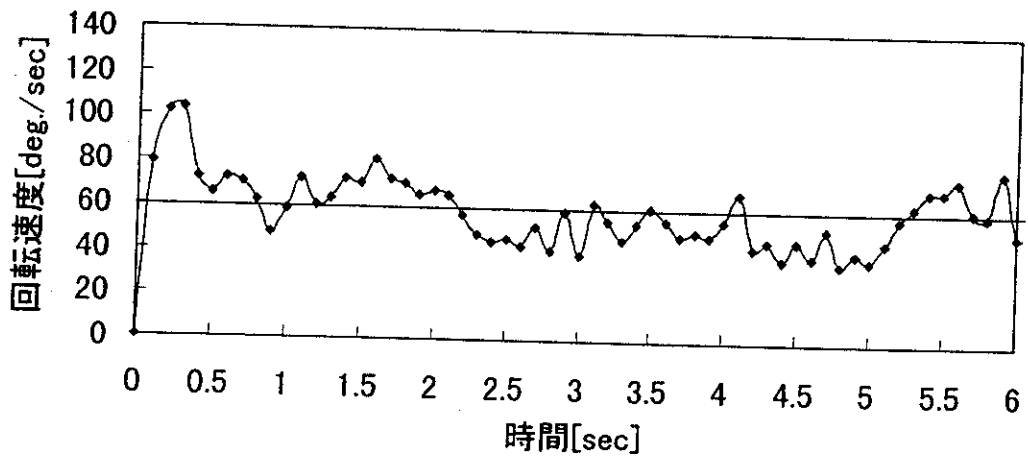


図 5.11-2 無制御<速度 60[deg/sec]>

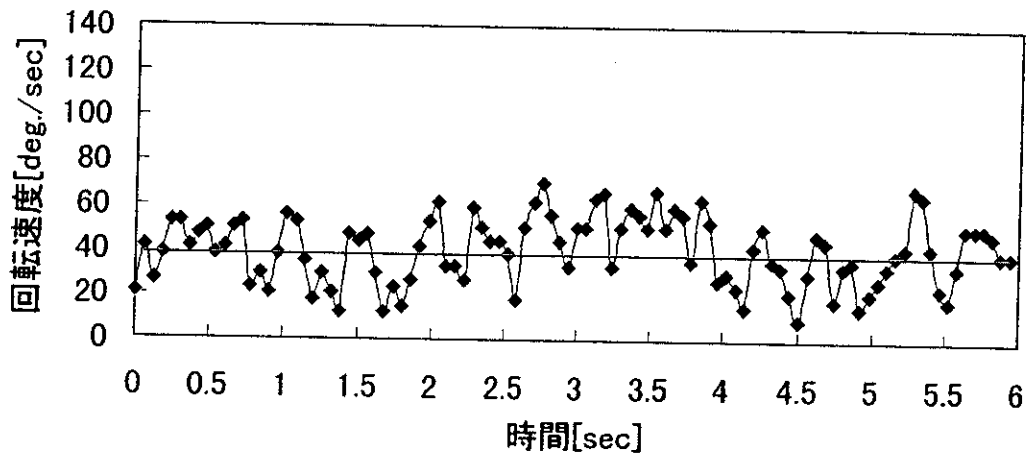


図 5.12-1 速度制御結果<目標速度 40[deg/sec]>

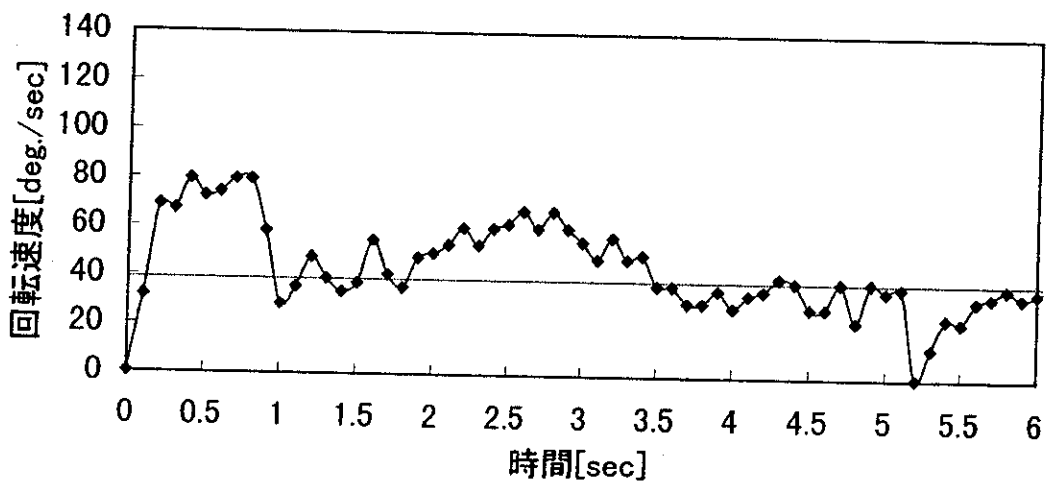


図 5.12-2 無制御<速度 40[deg/sec]>

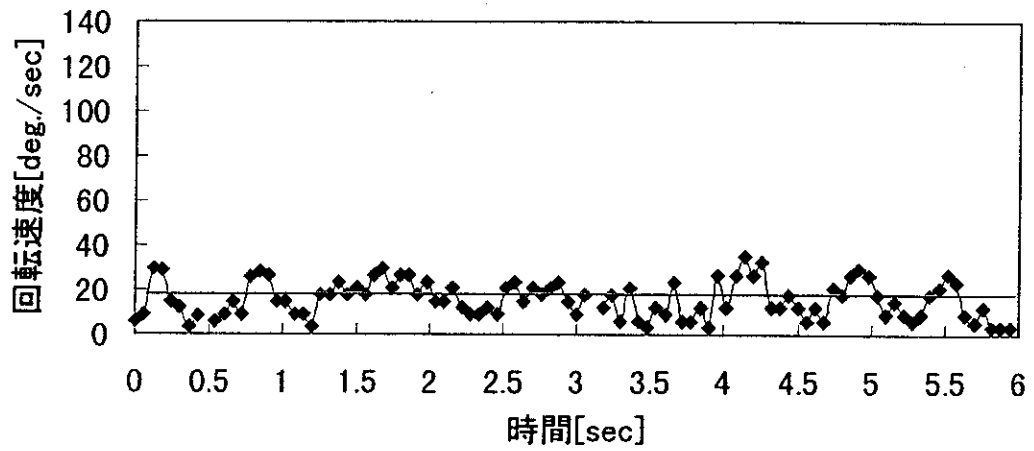


図 5.13-1 速度制御結果<目標速度 20[deg/sec]>

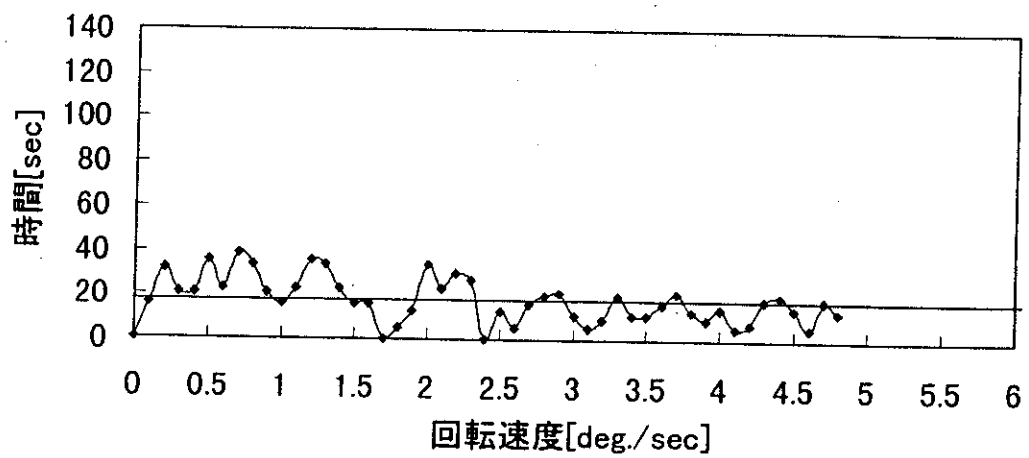


図 5.13-2 無制御<目標速度 20[deg/sec]>

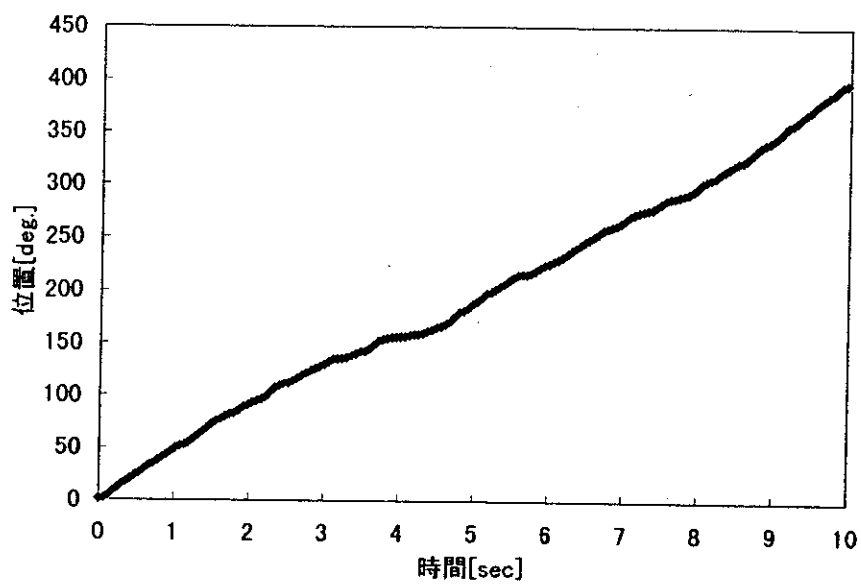


図 5.14 位置—時間グラフ<目標速度 80[deg/sec]>

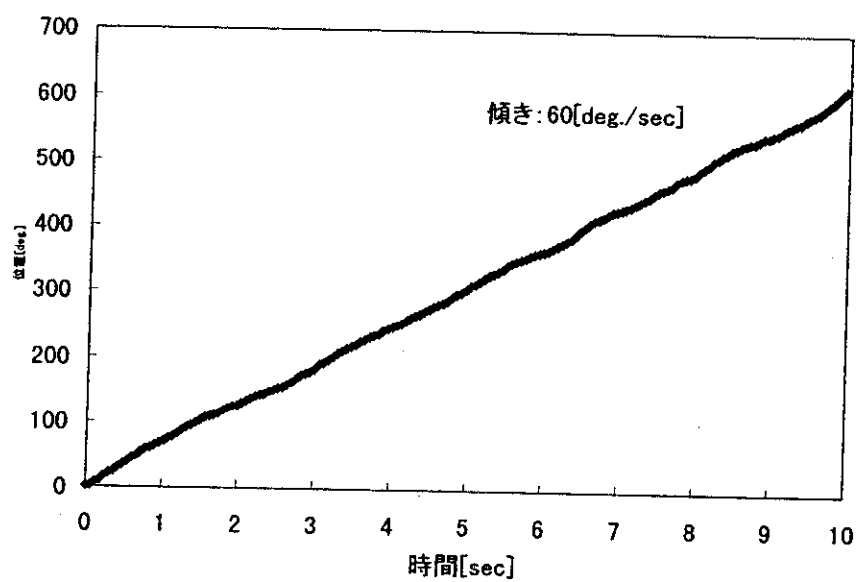


図 5.15 位置—時間グラフ<目標速度 60[deg/sec]>



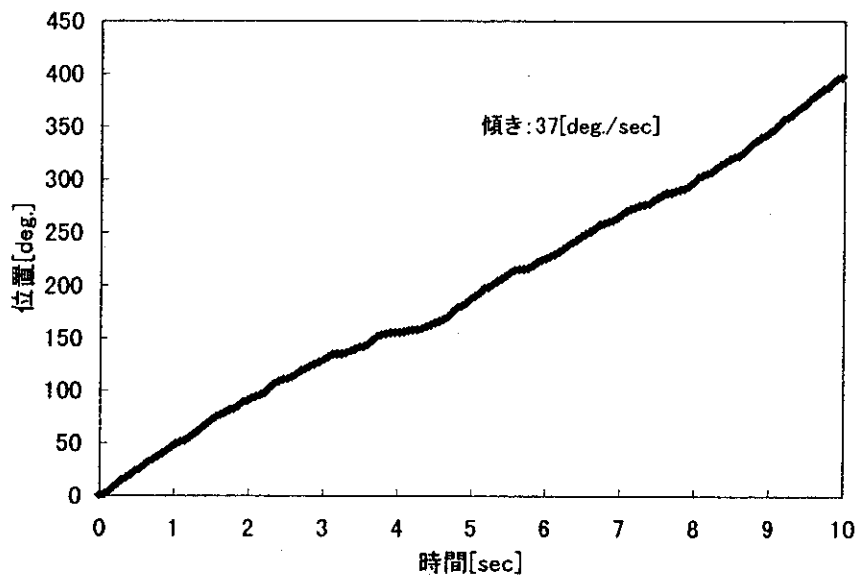


図 5.16 位置—時間グラフ<目標速度 40[deg/sec]>

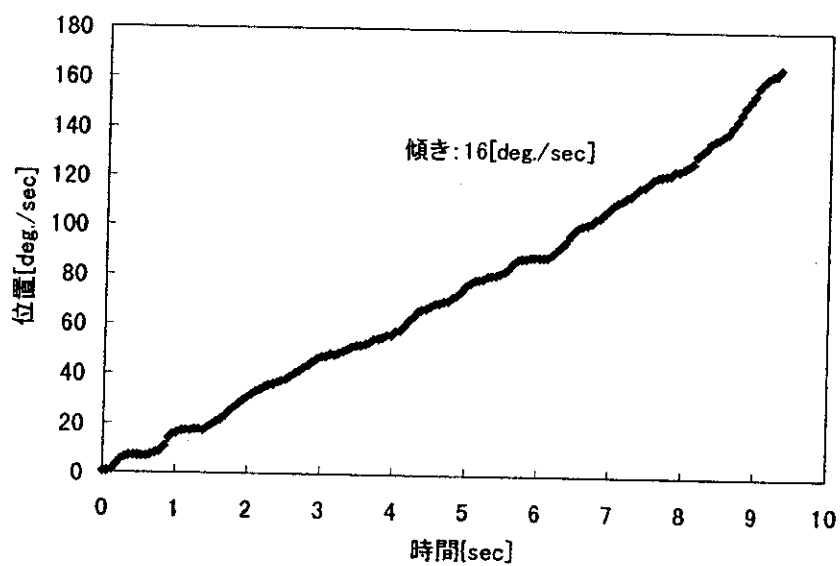


図 5.17 位置—時間グラフ<目標速度 20[deg/sec]>

## 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 5.18, 5.19, 5.20 に示す。図より、 $K=3$  で振動をはじめ、 $K=9$  を過ぎたあたりから発散し始めていることがわかる(拡散していないのは位相差に  $|\phi| \leq 90[\text{deg.}]$  という拘束条件をかけているため)。よって限界感度  $K_u=4.5$ 、限界周期  $T_u=2[\text{sec}]$  として最適調整を行う。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 動作は使用しない。

### 最適制御

これらの結果より、第 3 章表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 5.3 最適値

| 制御グレード $G$ | $\theta$ | $K_p$ | $T_i$ |
|------------|----------|-------|-------|
| 1.05       | 0.06     | 2.385 | 1.76  |
| 1.2        | 0.10     | 2.205 | 1.82  |

各実験の結果を図 5.21 に示す。

## 考察

表 5.4 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 5.4 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。

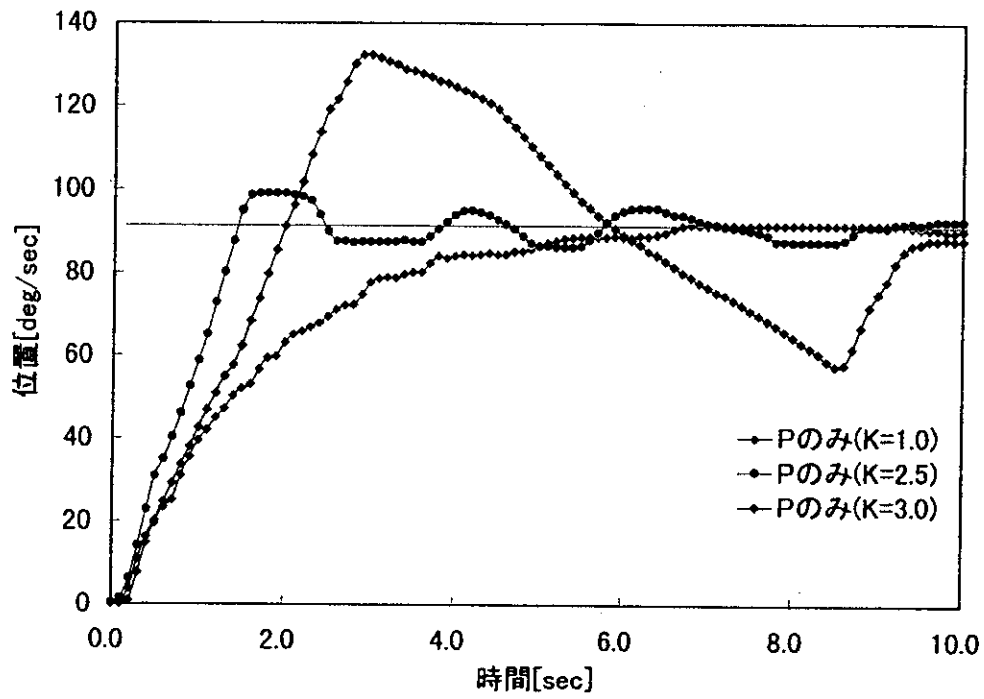


図 5.18 位置制御結果<目標回転角 90[deg]>

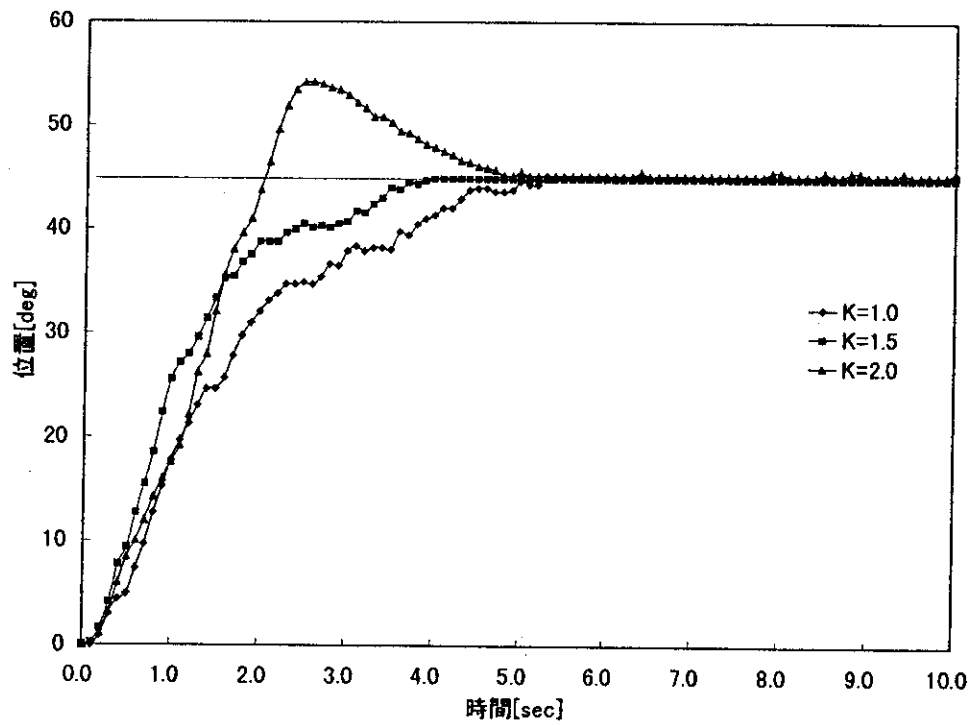


図 5.19 位置制御結果<目標回転角度 45[deg]>