

図 3.9 第 3 回目試作機 (直立)



図 3.10 第 3 回目試作機（抱き上げ動作）

## モータの高出力化

パワーアシストスーツのアクチュエータとして本研究室で開発を行ってきた超音波モータを使用する。パワーアシストスーツを駆動させるアクチュエータの推定必要トルクは  $50[\text{N}\cdot\text{m}]$  である。図 3.10 に示すように超音波モータのトルクは半径の 3 乗に比例することから本研究では超音波モータの外径は  $\phi 145$  とし、このモータから得られる理論上の値は  $10.5[\text{N}\cdot\text{m}]$  である。さらに本研究では図 3.11 に示す 1 枚のロータを 2 枚のステータで挟んだダブルサンドイッチ型超音波モータを使用する。サンドイッチ型にすることによりほぼ同体積で約 2 倍のトルクを得ることができ、さらに 2 組を組み合わせることでより図 3.12 に示すように減速機を用いず回転数を下げることなく約 1.7 倍のトルクを実現できる。

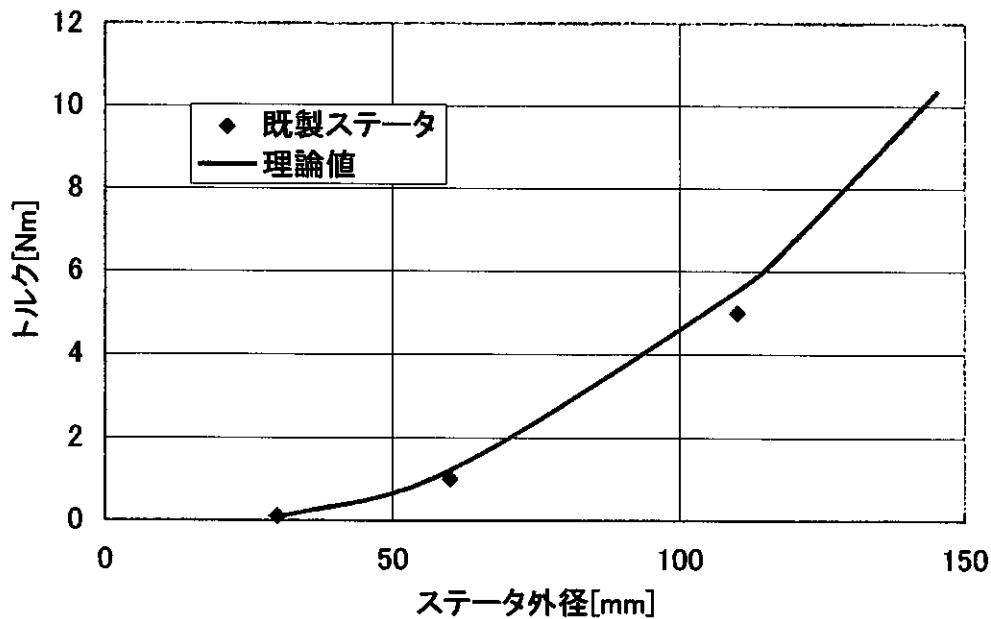


図 3.10 超音波モータのトルク 3 乗

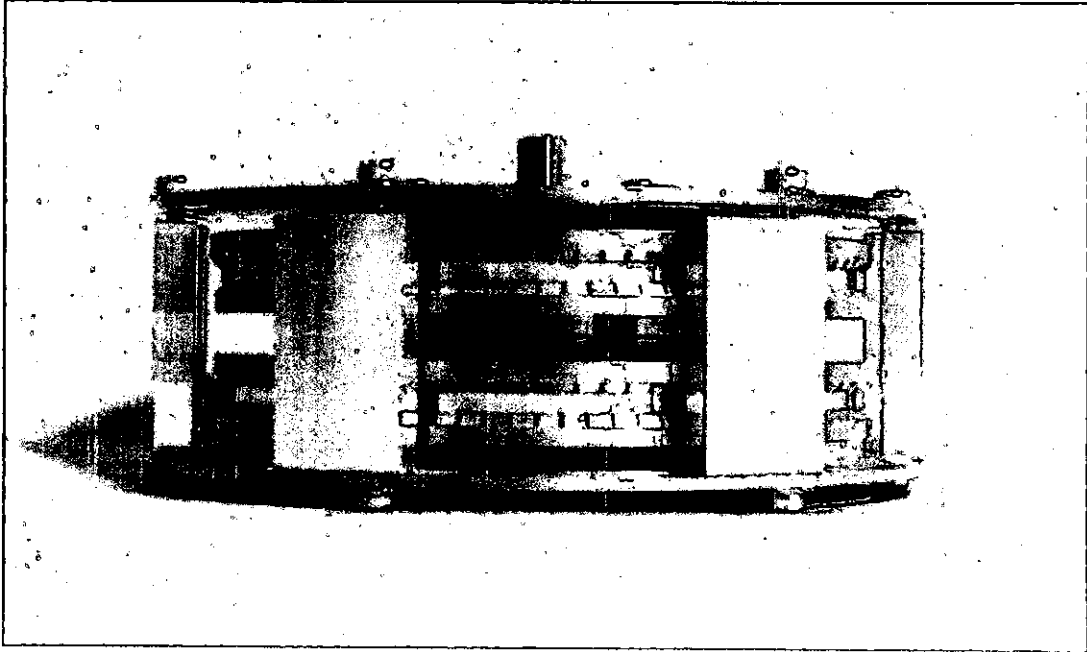


図 3.11 ダブルサンドイッチ型超音波モータ

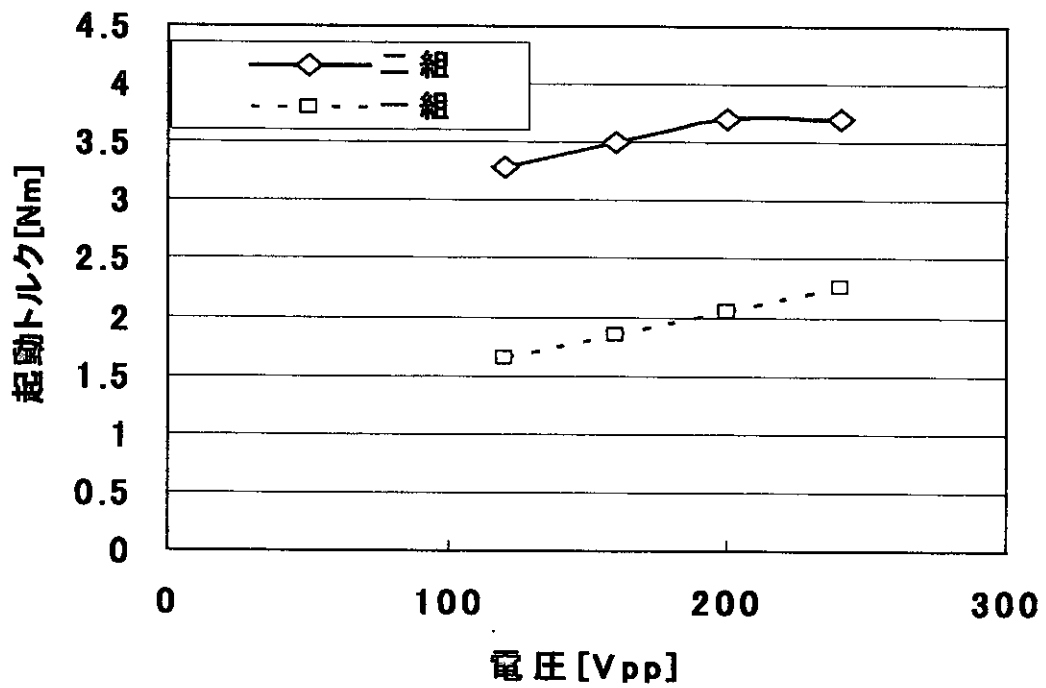


図 3.12 1組と2組の比較

## D. 考察

今回のパワーアシストスーツ 1号機の機構について総括的な評価を行うと、

- ・腰のスライドにより、スムーズな歩行が実現できている
- ・両脚接地時には装着者への負担は殆どなく、スーツ自重は地面に逃がっている
- ・腕部は抱き上げ動作で必要な可動範囲はほぼ満たしている
- ・腰回りの自由度が低いため、その場での方向転換に難がある。腰関節は改良の余地が大きい
- ・試作コストから板材を用いているため、背中当て板など身体形状に合わない
- ・アルミ材を用いているため、スーツ質量が大きい

ということがいえる。これらを踏まえ、次年度以降は

- ・腰関節部の更なる改良
- ・詳細な機構解析を用いた各部品への荷重の算出と、材料・形状の最適設計
- ・身体にならった形状
- ・多様な装着者の体格に合わせる調整機構

を中心に開発を行っていく。

また、アクチュエータについても先述のサンドウィッチ構造とすることで、次年度に向け更なる高トルク化が期待できる。

## E. 結論

パワーアシストスーツの機構を検討し，プロトタイプを試作した．試作を繰り返し，装着感と動きやすさを満足できるものとなった．

また，アクチュエータとして高出力超音波モータをサンドウィッチ構造とし，必要なトルクを得られる目処が立った．

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

パワーアシストスーツの制御に関する研究

研究者 永井 正夫 東京農工大学工学部教授

研究要旨

超音波モータは超音波振動を駆動力とする新しい原理のモータで、圧電素子の電歪現象を利用して微小振動を起こし、弾性体である金属製のステータに進行波を発生させ、それによって起こるステータ表面上の波の先端での楕円運動とロータの接触による摩擦力を利用して駆動量を得るアクチュエータである。超音波モータの動力特性は、ステータの振動解析、性能試験を繰り返し実用可能なレベルまでとなった。しかしハードウェアのレベルの向上と比較してソフトウェアの開発は遅れている。よって本研究では超音波モータにおいて、フィードバック機構を要した位置・速度制御技術の確立を目的としている。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。また今回実験に使用したサンドイッチ構造のモータは、超音波モータの出力を増大させるために2枚のステータを用いて、ロータをはさむような構造にしたものである。



# A. 研究目的

超音波モータは超音波振動を駆動力とする新しい原理のモータで、圧電素子の電歪現象を利用して微小振動を起こし、弾性体である金属製のステータに進行波を発生させ、それによって起こるステータ表面上の波の先端での楕円運動とロータの接触による摩擦力を利用して駆動量を得るアクチュエータである。超音波モータは従来の電磁式モータとは駆動原理が根本的に異なる構造を持っており、その特徴として小型軽量、低速で高トルク、磁気作用がないなど優れた性能と特徴を備えている。さらに供給電圧を絶った後でも保持力を有し、回転子の慣性が小さく応答性に優れている。超音波モータの動力特性は、ステータの振動解析、性能試験を繰り返し実用可能なレベルまでとなった。しかしハードウェアのレベルの向上と比較してソフトウェアの開発は遅れている。したがって超音波モータの実用化を考慮したソフトウェアの開発が必要であり、そこで重要なことは超音波モータ・球面超音波モータの独自性を十分に発揮できるという点である。超音波モータにおいては、力制御は行われているが精密な位置・速度制御は行われていない。よって本研究では超音波モータにおいて、フィードバック機構を要した位置・速度制御技術の確立を目的としている。また今回実験に使用したサンドイッチ構造のモータは、超音波モータの出力を増大させるために2枚のステータを用いて、ロータをはさむような構造にしたものである。

# B. 研究方法

## 2.1 制御法・制御パラメータの選定

これまで超音波モータの制御法として、PWM 制御，固定ゲイン PID 制御，可変ゲイン PID 制御，ニューラルネットワークを用いる手法が提案されている。しかし超音波モータは特殊なモータであるため，その動特性式は確立されたとはいえていない。さらに温度上昇や負荷トルクなどの駆動条件の変化によって特性が変化することが知られており，それに対してこれらの制御法はいくつかの問題点を持っている。

よって超音波モータを高性能で高精度に制御するには，まずこれら駆動条件の変化による特性変動を把握し，補償法の検討が必要である。

超音波モータの制御手法として一般に駆動周波数，印加電圧および印加電圧位相差制御による方法が提案されている。しかし位置制御を達成するためには超音波モータを連続的に CW, CCW, STOP することのできる印加電圧位相差による手法が有効であると思われる。印加電圧位相差制御には，多くのモータの制御に多々適用され信頼がある比例積分(PID)制御を適用し，さらに PID 制御器で対処しきれないパラメータ，駆動周波数についても検討する。

よって本研究では，印加電圧位相差及び駆動周波数の両方を制御することでハイブリッド化による安定制御を試みる。

## 2.2 PID 制御

### 2.2.1 アナログ PID 制御

フィードバックの基本は PID 制御であり、これまで超音波モータの制御に多々適用されている信頼性の高い制御器である。

アナログ制御における PID 制御のブロック線図を図 2.1 に、制御演算式を式(2.1)に示す。

式(2.1)において偏差  $e$  に比例する項を P(Pro-portional)動作、偏差  $e$  の積分に比例する項を I(Interral)動作、偏差  $e$  の微分に比例する項を D(Differencial)動作といい、この 3 つの動作をあわせて持つものを PID 動作(制御)という。

$$y = K \left( e + \frac{1}{T_I} \int e dt + T_D \frac{d}{dt} e \right) \quad (2.1)$$

PID 制御の基本動作は P 動作である。I 動作と D 動作は P 動作の欠点を補い、制御成績をさらに高めるための補助動作である。

P 動作では操作変数  $y$  の値は偏差  $e$  の値に比例して連続的に変化させることができる。最も簡単な制御法のひとつである On/Off 制御では操作変数の値は 2 値であるためハンチングを起こしやすいが、PID 制御では操作変数  $y$  の値は連続可変であるためハンチングを起こすことなくよりよい制御成績が得られる。

PID 制御は制御演算式が簡潔であるにもかかわらず、非常によりよい制御が期待できさらに使いやすいという大きな特徴がある。

## 2.2.2 制御対象に対する PID 各動作の作用と限界

ここでは各動作の効能と限界について述べる。

### ① P 動作

オフセットの大きさは比例ゲイン  $K$  の値を大きくすると小さくなる。理論的には比例ゲイン  $K$  の値を  $\infty$  にするとオフセットはゼロになるが、 $K$  の値の増大させると制御変数は振動する。したがって  $K$  の値を  $\infty$  にすることはできず、実用上はオフセットを 0 にすることはできない。そのためオフセットを 0 にするには I 動作を用いる必要がある。しかし、制御成績に対する要求がゆるく、対象が制御しやすい特性ならば、制御演算式は P 動作だけでも十分な場合がある。比例ゲイン  $K$  を大きくとることのできる制御対象の場合は、P 動作だけでもオフセットを小さく押さえることが可能である。また、一般に P 動作は応答速度を速める働きがある。

### ② On/Off 制御

On/Off 制御を適用できる制御対象も P 動作において比例ゲイン  $K$  を十分大きく取ることのできる制御対象である。すなわち、On/Off 制御は P 動作で比例ゲインを無限大とした制御として考えることができる。

### ③ I 動作

I 動作は、P 動作の欠点であるオフセットをゼロにする効果がある。なお I 動作は単独でもコントローラとして動作することができるが、P 動作と組み合わせたほうがよい制御成績を期待できる。

### ④ D 動作

D 動作も P 動作を補助しよりよい制御成績を得る目的で使用する。D 動作は単独では制御能力を持たないため必ず P 動作、または PI 動作と組み合わせて使用される。

D 動作の効能は制御応答を速くし、制時間を短くすることができる。つまり制時間を短くする。微分動作は遅れの大きい制御対象に有効であるといわれているが、遅れの小さい制御対象に対しても有効である。しかし遅れの小さい制御対象は、微分動作なしでも十分により制御成績が得られる。ただし D 動作は操作変数の値を急変させるため、これが好ましくない場合は使用できない。

### 2.2.3 デジタル PID 制御

フィードバック制御においては、従来はアナログの PID 制御が多く用いられてきた。それは PID 制御は制御演算式が簡単であり、かつ非常により制御が期待できる点が多い。近年、コンピュータによるデジタル制御においても、PID 制御は多く用いられ、高度の制御演算が実現されている。デジタル制御は単なるデジタル化ではなく、コンピュータ制御であることが大きな特徴である。コンピュータ、特にマイコンは複雑な制御演算を安価に行うことができる。よって、コンピュータの演算機能を活用することによりアナログ制御と比べ、高度かつ経済性のある制御システムを構築できることがデジタル制御の最大メリットである。しかしデジタル化の結果、制御変数はサンプリングされ飛び飛びの値となるため、もとのアナログ量に変化しているにもかかわらず、情報が失われてしまう可能性がある。よってデジタル制御はアナログ制御と比べて劣る可能性を持っている。したがって、制御に必要な情報が失われないようにサンプリングすることが必要となる。

デジタル制御がその効果を発揮するのは、単純な PID 制御ではなくより高度の制御においてであり、それらをアドバンス制御と呼んでいる。本研究では、アドバンス制御の制御要素として PID 制御をベースとし、それに他の要素を付け加え、複数の PID 制御を組合すことでより高度な制御の実現を目指す。(図 2.2)

## 2.2.4 アナログ PID 制御演算式のデジタル化

本実験ではコンピュータによるデジタル制御を行うため、式(2.1)のアナログ PID 演算式を次のようにデジタル化して用いる。

### ・P 動作

アナログの連続式をそのままサンプリングに置き換える。

すなわち比例項は

$$Ke_1$$

となる。

### ・I 動作

アナログの積分は、次のように定義されている。

$$\int x dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \sum_{i=0}^{i=n} x_i \Delta t \right) \quad (2.2)$$

アナログの場合時間的に連続であるが、極限として  $\Delta t$  を 0 にすることができる。しかしデジタルはサンプリングであるので、 $\Delta t$  の最小値はサンプリング周期  $\theta$  となる。したがってデジタルの積分は、以下のようなになる。

$$\sum_{i=0}^{i=n} x_i \theta = \theta \sum_{i=0}^{i=n} x_i \quad (2.3)$$

この和を  $\sum x_n$  と略記する。したがって積分項は次のようになる。

$$\frac{\theta}{T_i} \sum e_n \quad (2.4)$$

### ・D 動作

微分も積分と同様に考えて、アナログ微分の定義

$$\frac{d}{dt} x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \quad (2.5)$$

において、 $\Delta t = e_n - e_{n-1}$ 、 $\Delta t \rightarrow \theta$  とおくことにより以下のようになる。

$$\frac{T_D}{\theta} (e_n - e_{n-1}) \quad (2.6)$$

### ・PID 動作

以上から、PID 制御演算式は以下のように表される。

$$y = K \left( e_n + \frac{\theta}{T_I} \sum e_n + \frac{T_D}{\theta} (e_n - e_{n-1}) \right) \quad (2.7)$$

しかし今回は、式(2.7)を以下のように変形して用いる。これによりさらにアナログ制御により近い特性を持つことになる。

$$y = K \left( e_n + \frac{\theta}{2 T_I} \sum (e_n + e_{n-1}) + \frac{T_D}{\theta} (e_n - e_{n-1}) \right) \quad (2.8)$$

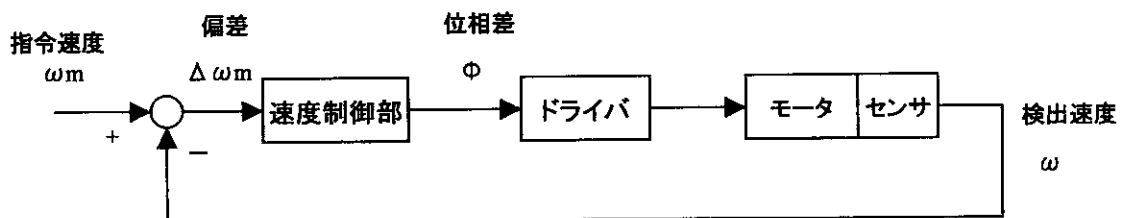


図5.6 速度制御システム

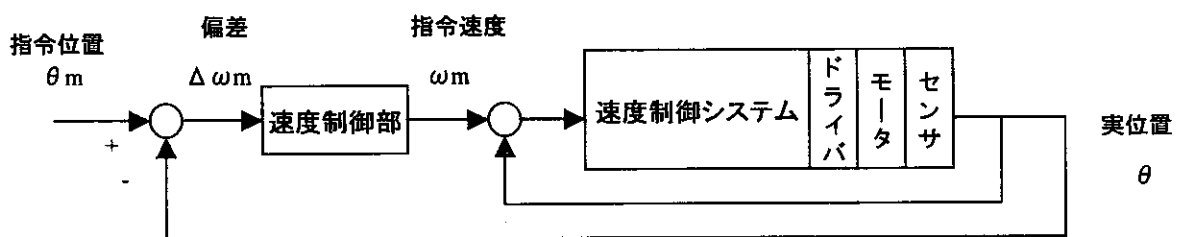


図5.7 速度制御システム



## 2.3 PID 制御の最適調整

### 2.3.1 調整の必要性

フィードバック制御の制御成績は制御対象の特性に依存する。よい制御成績を得るためにはコントローラの特性を制御対象に合わせて調整することが必要であり、デジタル PID 制御の場合には、PID パラメータの比例ゲイン  $K$ 、積分時間  $T_i$ 、微分時間  $T_d$  の他に、サンプリング周期について調整する必要がある。デジタル制御は連続のアナログデータをサンプリングしており、定性的にはサンプリング周期を長くすると高周波の情報が失われるため、制御成績は悪くなることもある。よって、制御対象に応じてこれらパラメータの最適な組み合わせを、実用的な立場から求めることが必要である。多くは次式を評価関数としてこれを最小とする PID パラメータの値を求める。

$$I_e = \int_0^{\infty} e^2 dt \quad (2.8)$$

制御時、最適条件から外れた際に、評価関数の値が変化する度合いを最適解の感度といい、最適解の感度が低いほうが使い易いシステムといえる。PID 制御は最適解の感度が低く、使い易いことが大きな特徴であり、それは広く普及し、多く使用されている一つの理由である。

### 2.3.2 サンプリング定理

アナログの情報はサンプリングによって失われる可能性があり、したがって制御に必要な情報が失われないようにサンプリングすることが必要である。

ここに、どのようにサンプリングすれば情報が失われないかを定量的に示すサンブ

リング定理と呼ばれる定理を示す。

「ある正弦波形の情報を失わないようにサンプリングするためには、その正弦波形の周波数の少なくとも 2 倍の周波数でサンプリングすることが必要である。」

ある任意波形のアナログ曲線は、式(3.9)に示すように多数の周波数の異なった正弦波の形で表される。

$$x(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots \quad (2.9)$$

$x(t)$  : 任意曲線(フーリエ級数に展開可能)

またある実在する任意波形には周波数帯域があり、その波形を構成する正弦波形には最高周波数が存在する。したがってある周波数の正弦波形の情報を失われないようにサンプリングする条件を求めることができれば、任意の波形の場合の条件も求めることが可能になる。サンプリングは通常ある一定の周期で行い、周期の逆数は周波数であるためサンプリングも周波数で表すことができる。

このサンプリング定理は、時間軸だけでなく他の変数軸に対しても成立する。

### 2.3.3 最適調整法の選定基準

デジタル PID 制御の最適調整法の選定基準として以下のような基準があげられる。

#### ①簡単であること

特殊な実験装置が不要なこと、実験が簡単なこと、計算が簡単なことなどがあげられる。

#### ②制御対象を乱さないこと

この条件は、実際の制御対象で実験を行うときには実用上きわめて重要である。しかし制御対象にまったく影響を与えないということは一般には無理であるためできるだけ乱さない、ということが目標になる。

### ③最適解の正確さ

上記条件を満足するためには最適解の正確さは若干低くてもよいこととする。最適に対する感度が低いPID制御システムなのでこの条件は許容できる。

### ④最適解の評価関数

最適解を求めるためには何が最適かという評価関数を設定する必要がある。この評価関数として偏差2乗面積最小[式(2.8)]を用いる。

最適調整法にはトライアルや、制御対象の特性を求めるなど様々な方法があるが、本論文では以上の基準に従った最適調整法として拡張限界感度法を採用して用いる。

## 2.4 拡張限界感度法

デジタルPID制御の最適調整法のひとつに拡張限界感度法と呼ばれる方法がある。これは実用性を重視しており、

- ・簡単である
- ・制御対象を乱さない
- ・最適解の正確さ

といった最適制御を行う際の基準を満たしている。

拡張限界感度法は簡単な実験を行い、得られたデータから最適条件を推定するものである。

### 2.4.1 限界感度法の手順

実験は以下の手順で行う。

① P動作のみの制御にする

実験を行うために、制御をP動作のみにする。これにより実験野ための乱れは小さく押さえることができる。

② サンプリング周期

サンプリング周期は理論的には0とする必要がある。しかしデジタルコントローラで実験すれば、実際サンプリング周期ゼロは実現できない。よって実用上はそのデジタルコントローラの最小のサンプリング周期で実験を行う。

③ 比例ゲイン  $K$  を大きくする

P動作のみに制御にしたのちP動作の比例ゲイン  $K$  を少しずつ大きくしていく。このとき、最初は非振動的な状態からスタートをする。もしP動作だけの制御に切り替えた段階ですでに不安定だとすれば直ちに比例ゲイン  $K$  を小さくし、不安定な状態から脱する必要がある。

④ 持続振動の状態にする

$K$  の値を大きくしていくと次第に振動的になり、そして持続振動の状態になる。この状態で実験を終える。この実験では安定限界を求めたことになり  $K$  の値をさらに大きくすると、発散する振動になる。

⑤ データを採取する

持続振動を起こしているときの比例ゲインの値  $K_u$  とその時の振動の周期  $T_u$  をデータとして採取する。  $K_u$  を限界感度、  $T_u$  を限界周期と呼ぶ。

⑤ 最適地の推定

$K_u$  と  $T_u$  の値から、表 2.1 より最適な PID パラメータを推定する。