

## 3I 工学実験・実習Ⅱ サーボモータ

目的:

メカトロニクスといわれる産業分野が大きく成長するに従い、モータとその制御技術についての知識は、エレクトロニクス技術とともに技術者にとっては不可欠なものとなっている。ここでは、代表的なモータとして AC モータ、DC モータおよびステッピングモータをとりあげ、制御に必要なモータの特性を求める。

サーボモータとは

サーボとは、英語の“スレーブ”または“サーバンド”の意味を持ち、命令に忠実に追従する制御用モータを意味している。そのためには、単に効率よく回転する動力源としてのモータではなく急激な加速、減速、あるいは逆転、停止が確実に行わなければならない。

これを実現するために電気式、油圧式、空気圧式などの各種の方法が考えられる。信号伝達および経済性を考えると現状では極小容量では空気圧式、小～中容量は電気式、大容量には油圧式のサーボが適しているといえる。しかし性能面では電気式が最も優れている。

初期の電動サーボは、制御用電力の増幅技術やサーボ装置（サーボモータ、アクチュエータ）が十分に発達していなかった為、その用途は限られていた。しかし、現在では半導体制御が主流であり、対象とする制御用モータの価格とほぼ同程度の価格で制御装置（電力増幅および制御装置）が供給されるようになっている。サーボモータに関しても高性能磁性体や耐高温絶縁体の発明によりパワー密度は 2～4 倍に増大している。このほかの制御に欠かせない高性能の回転センサ（位置および速度）の供給が自由に受けられることや、制御用 IC や論理素子の発展により電動サーボシステムは油圧サーボ、空気圧サーボに対して絶対的優位の立場に立っている。

電動サーボモータを大別すると、AC サーボモータと DC サーボモータに分けられる。学問の世界では AC モータか DC モータかを分別する場合、電機子巻線に供給される電力が交流か直流かにより分類される。この場合 VR 型ステッピングモータや、HB 型ステッピングモータも脈動電流であるが、電機子には直流電流が供給されるため DC モータに分類されることになる。しかし一般的には、メカニカルなブラシと整流子を持つものを DC モータ、持たないものを AC と分類する。この場合、前述のステッピングモータは、AC モータに分類される。

# 実験項目

## AC サーボモータの実験

実験1－1 トルク－速度特性の測定実験

## DC サーボモータの実験

実験2－1 トルク－速度特性の測定実験

実験2－2 特性定数の測定実験

## ステッピングモータの実験

実験3－1 角度－トルク特性の測定実験

実験3－2 動特性の測定実験

## アームロボットの操作実習

## 1. AC サーボモータの実験

本実験では、出力 15 W の二相インダクションモータを用いる。

### 実験 1-1 トルク—速度特性の測定

実験装置

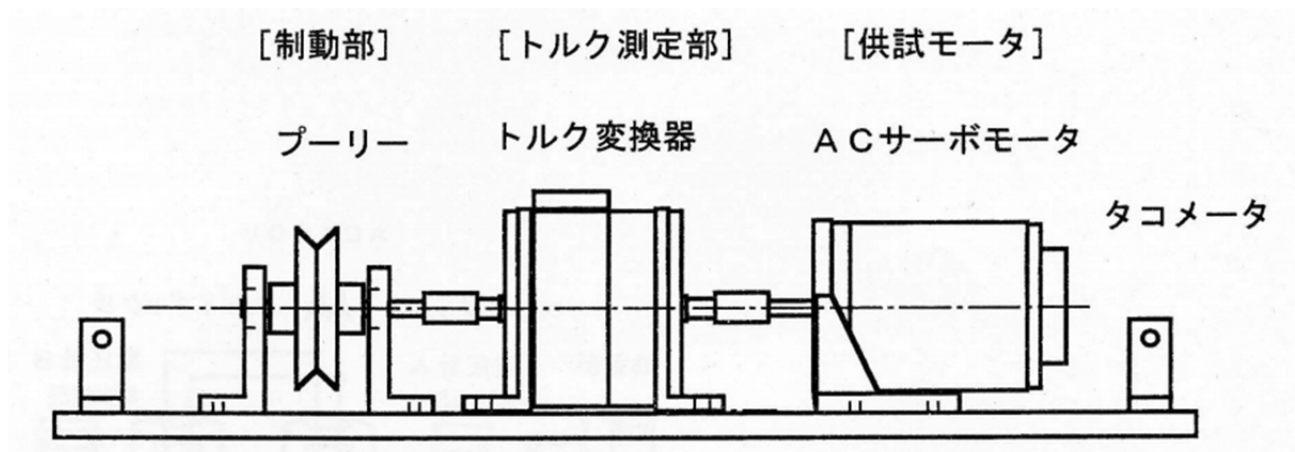


図 1-1 トルク—速度特性の測定装置

図 1-1 は実験装置の概略図である。駆動部ではプーリーに糸をかけ、糸の一端を台に固定し、他方に分銅の荷重をかけて、糸とプーリーの摩擦力で外部トルクを発生される。

トルク測定部は、トルク変換器と動ひずみ計から構成される。トルク変換器は、モータ側の軸と付加側の軸の間にひずみゲージが入っており、伝達トルクに応じてひずみゲージにねじれひずみを生じさせるものとする。動ひずみ計は、ひずみを電気信号に変換し表示させるものであり、ひずみゲージを一端とするブリッジ回路を構成する。

供試モータは、二相のインダクションモータであり、さらにタコメータ(交流発電機)が出力軸と反対側に継がれている。

モータの結線図は図 1-2 のようである。励磁コイルのインダクタンスと外部に接続するコンデンサによって、制御コイルの電圧  $V_1$  (制御電圧) 励磁コイルの電圧  $V_2$  (励磁電圧) の位相差は、 $90^\circ$  となる。スライダックは速度—トルク曲線を測定中、制御電圧  $V_1$  および励磁電圧  $V_2$  を一定に保つためのものである。(特に励磁電圧は、回転速度によってかなり変化する。)

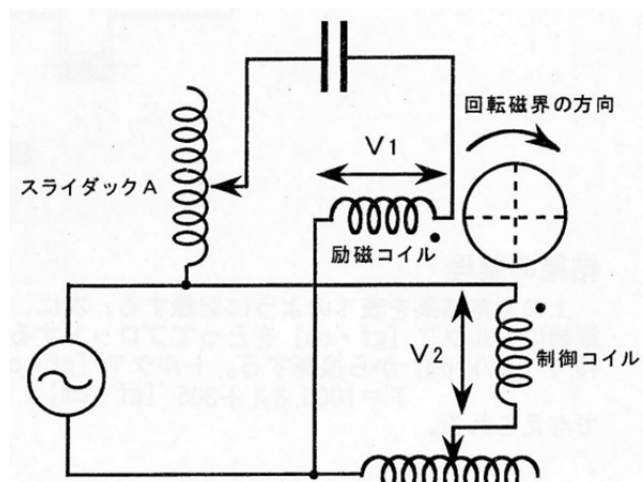


図 1-2 モータ結線図 1

## 実験方法

1. 動ひずみ計の電源を ON にし、較正を行った後、測定状態にする。
2. 励磁電圧を 80V、制御電圧を 80V になるように、スライダックで調整する。これにより電動機は回転する。
3. プーリーの糸を外し、無負荷における動ひずみ計の指示と、タコメータの出力電圧の値を読み取る。
4. プーリーに糸をかけ、分銅の重りを徐々に増すことによりモータの回転数を変化させ、そのときの動ひずみ計の値と、タコメータの出力電圧を読み取る。この場合、付加が増えモータの速度が低下すると、励磁電圧  $V_2$  の値も低下するので、スライダックでそれが 80V になるように調整する。制御電圧の変化は少ないが、念のためにときどき一定(80V)かどうかを確認する。

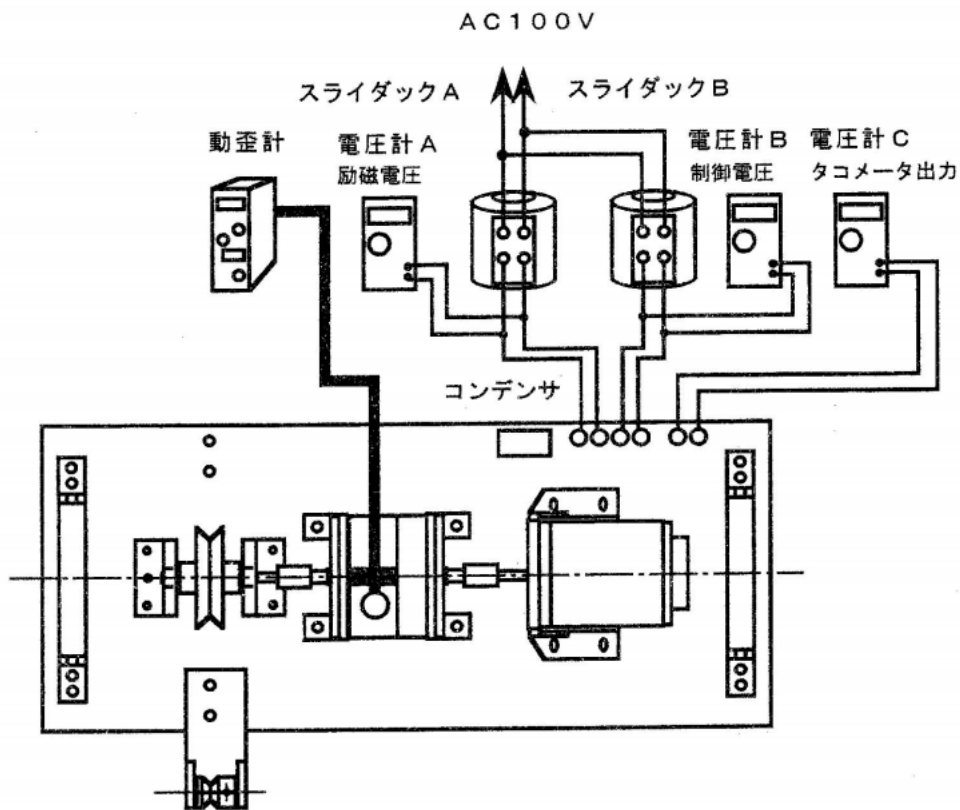


図 1-3 モータ結線図 2

## 結果の整理

上の測定結果を表 1-1 のように記録する。次に、図 1-4 のように横軸に回転速度  $\theta$  [rpm]、縦軸にトルク  $T$  [gf·cm] をとってプロットする。回転速度の値は、タコメータの発電機定数 19.7[V/krpm] から換算する。トルク  $T$  [gf·cm] は、動ひずみ計の表示  $\lambda$  [V] に対し、

$$T = 1005.8\lambda + 305 \quad [\text{gf} \cdot \text{cm}]$$

で与えられる。

表 1-1 トルクと速度の関係

タコメータ 出力電圧[V]	回転速度 $\dot{\theta}$ [rpm]	動ひずみ計[V]	トルクT [gf・cm]
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

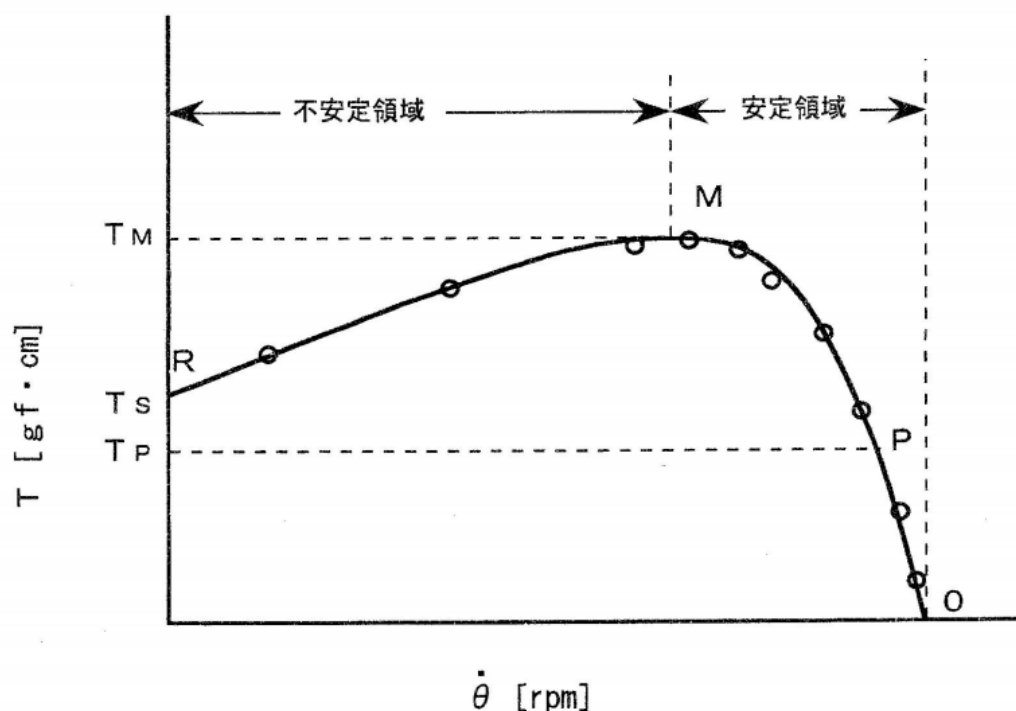


図 1-4  $T - \dot{\theta}$  特性

電源電圧が一定の場合、回転速度とトルクの関係は図 1-4 のようになる。無負荷の場合は同期速度（交流電源による回転磁界の回転速度）に近い速度で回転するが、負荷の増加とともに速度が落ちて、負荷とモータのトルク $T_p$ がつり合った点 P で回転する。

さらに負荷が増加して M 点に至れば、モータはこれ以上のトルクを発生できないので点 R に至って停止する。

すなわち R - M 間の不安定な範囲で、モータとして安定して運転できるのは M - O 間になる。

## 2. DC サーボモータの実験

本実験では、出力 20W の永久磁石界磁型 DC モータを用いる。

### 実験 2-1 トルク-速度特性の測定

実験装置

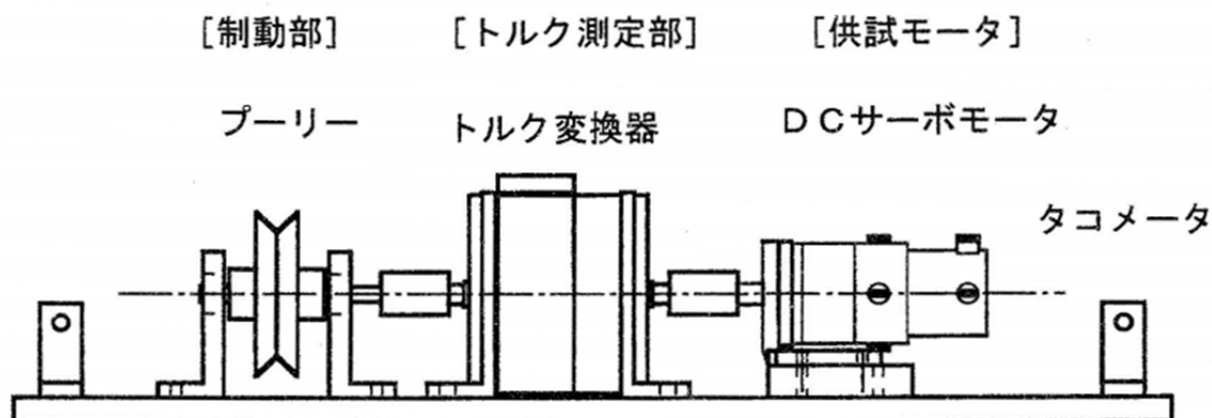


図 2-1 トルク-速度特性の測定装置

装置は AC サーボモータの場合と同じである。モータの出力軸に対して、反対側には、タコメータ（直流発電機）が同軸で継がれている。

実験方法

1. 動歪計の電源を ON にし、説明書に従って較正を行った後、測定状態にする。
2. 直流電源のつまみを調整して、モータへの印加電圧を一定値 (10V および 12V) に保ちながら、負荷を変え、そのときの動歪計、タコメータの出力、および電流計の値を読む。  
このとき電流値、および速度が定格値を超えないように注意する。

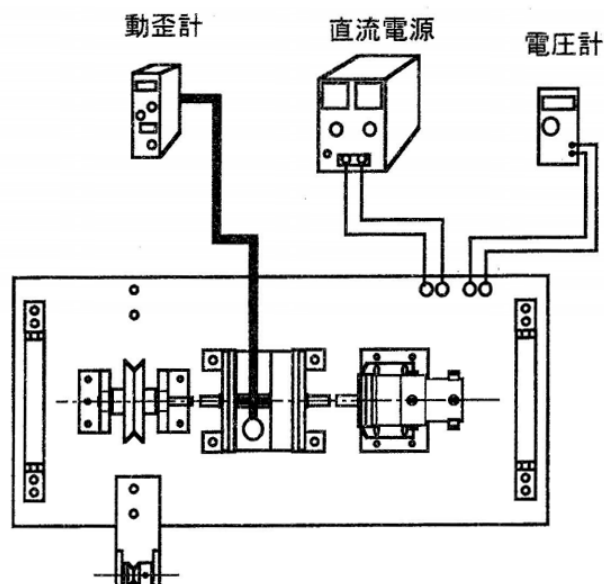


図 2-2 モータ結線図 1

## 結果の整理

上の測定結果を表 2-1 のように記録する. 次に, 図 2-3 のように横軸に回転速度  $\dot{\theta}$  [rpm], 縦軸にトルク  $T$  [gf·cm] をとってプロットする. 速度の値は, タコメータの発電機定数 3.0[V/krpm] から換算する. トルク  $T$  [gf·cm] は, 動ひずみ計の表示  $\lambda$  [V] に対し,

$$T = 375.9\lambda + 376 \quad [\text{gf} \cdot \text{cm}]$$

で与えられる.

表 2-1 トルクと速度の関係

タコメータ 出力電圧[V]	回転速度 $\dot{\theta}$ [rpm]	動ひずみ計[V]	トルク $T$ [gf·cm]
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

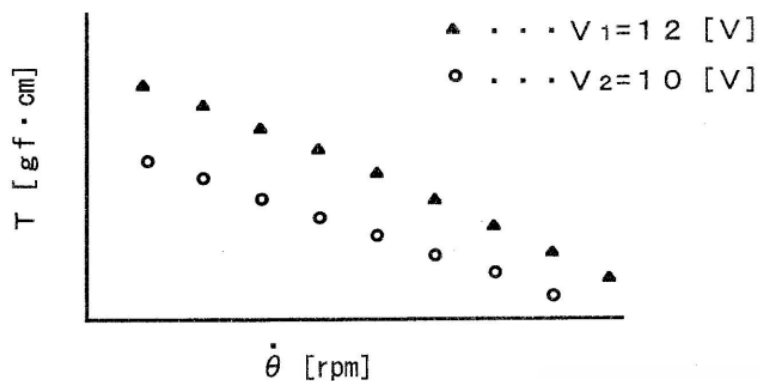


図 2-3  $T - \dot{\theta}$  特性

## 実験 2-2 特性定数の測定

### 実験方法

#### 1. 入力電圧—無負荷速度曲線の測定実験

図 2-4 のように, DC モータを無負荷状態にし, 印加電圧に対する定常状態の回転速度を測定する. 印加電圧および回転速度は定格値を超えないように注意する(3000 rpm 以下).

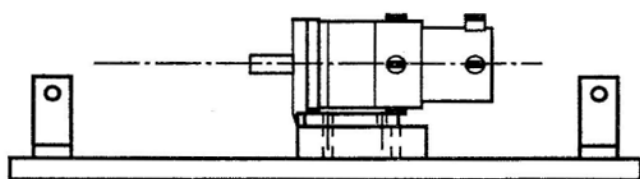


図 2-4 無負荷速度の測定

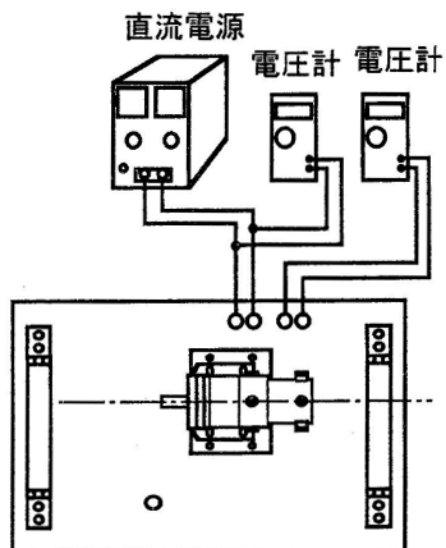


図 2-5 モータ結線図

### 結果の整理

上の測定結果を表 2-2 のように記録する. 次に, 横軸に印加電圧, 縦軸に回転速度をとって図 2-6 のようにプロットする.

表 2-2 印加電圧と速度の関係

印加電圧 $V_1$ [V]	タコメータ 出力電圧[V]	回転速度 $\dot{\theta}$ [rpm]
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.

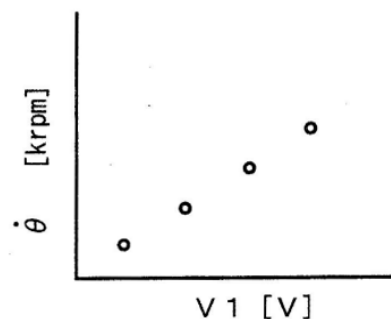


図 2-6  $V_1 - \dot{\theta}$  特性



DC モータの無負荷速度 $\dot{\theta}$ と印可電圧 $V$ の関係, トルク $T$ と電流値 $I$ の関係は, それぞれ次式のようになる.

$$\dot{\theta} = \frac{V}{K_a} + m \quad [\text{krpm}]$$

$$T = K_T \cdot I + n \quad [\text{gf} \cdot \text{cm}]$$

### 3. ステッピングモータの実験

本実験では、最大静止トルク 6 kgf・cm, 1 ステップ 1.8° の 2 相励磁型 HB ステッピングモータを用いる。

#### 実験 3-1 角度—トルク速度特性の測定

実験装置

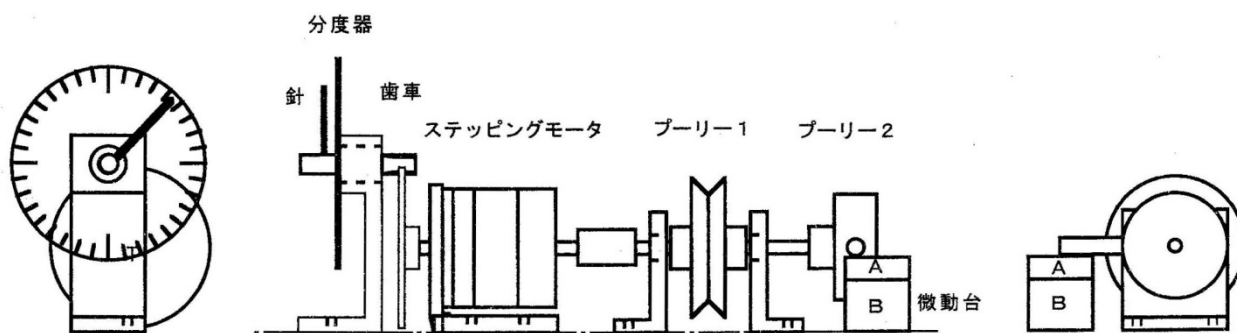


図 3-1 実験装置

図 3-1 は実験装置の概略図である。本実験に用いるステッピングモータの 1 ステップ角度は 1.8°，またある相に励磁した場合の、静止トルクの角変位に対する周期は、7.2° とかなり小さいため、ロータ角変位の値は、歯車で 10 倍に拡大したあと、分度器で読む。外部から加えられる負荷トルクは、プーリーに糸の一端を固定し、他端に分銅をつるすことによって発生させる。

微動台、ナット A とナット B から成り、ボルト A を一回転させると A は B に対し、0.5mm 垂直方向に移動する。これは、静止トルクが角変位の増加に対し減少する範囲(図 3-3, A～B)を測定するときに用いる。

ステッピングモータを駆動させるためには、モータを駆動回路に接続する。駆動回路のシャーシには直接電源が接続されており、ステータコイル励磁用電源 24V と、駆動回路用電源 5V とを供給する。直流電源のオン、オフは、AC100V 用のコードの途中についているスイッチで行う。またシャーシには他のパルス信号入力用の端子と、正逆回転方向の切り替えスイッチ、励磁電流切り替えスイッチがついている。これにより 1 相励磁(0.3A), 2 相励磁(0.6A)の切り替えが出来る。

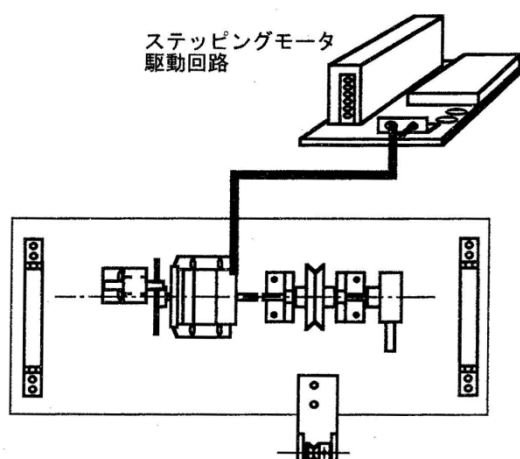


図 3-2 接続図

## 実験方法

1. 直流電源のスイッチを入れ、モータを励磁する。このとき励磁電流の切り替えスイッチは 1 相励磁(0.3A)にしておく。つぎに指針が $0^\circ$ の位置を示すようにネジで調整する。(分銅をのせると指針は時計方向に角変位する)
2. 分銅を乗せない場合の目盛円盤の指示位置を記録する。
3. 分銅のおもりをましながら、おもりに対応する目盛円盤のおのこの指示値を読み取る。

図 3-4 の原点から A までの領域では、おもりによるトルクとモータの復元トルクが安定につりあいの位置で静止するので、上記の方法で測定できるが、静止トルクが角変位に対し、負勾配の範囲(点 A から B までの範囲)では、上記の方法では測定できない。つまり、図 3-4 の点  $P_1$  に対応する分銅(点  $Q_1$  の分銅に等しい)により、点  $P_1$  に静止させることは可能だが、点  $Q_1$  の位置の静止は難しい、そこで、つぎのようにして A~B の領域の曲線を求める。

4. 分銅を 0 にして、励磁したままで軸を右へ  $7.2^\circ$  まわし、指針が目盛円盤の 72 の位置へくるようにする。(この場合の軸の静止位置は図 3 で  $O'$  の位置である)
5. この位置でプーリー 2 のピンが手前向き水平になるようにねじを調整する。ピンの微動台の上部に接するように微動台をピンの下におく。(図 4)
6. 分銅をのせ、微動台 N をまわして上へあげ、ピンを押し上げることにより、指針を左方向へまわす。ロータ角変位は図 3-4 において、 $O' \rightarrow A' \rightarrow B'$  の方向へ少しずつまわす。また、N をまわすだけでなく、微動台全体をプーリーに近づけてもよい。
7. N をまわしていくと、ある位置で指針の位置が急変し、N から離れる。これは図 3-4 でいえば、負荷トルクが  $Q_1$ 、 $Q_2$  であるとする、指針の位置が B を通り過ぎて  $Q_1$  の位置を通過するとモータの復元トルクが大きくなり、点  $P_1$  まで移動してそこで制止するということである。
8. 指針の急変する目盛の位置をよみとる。従って、微動台の N はゆっくりまわすか、あるいはプーリーに近づける。
9. 分銅のおもりを変えて同様の測定を行う。

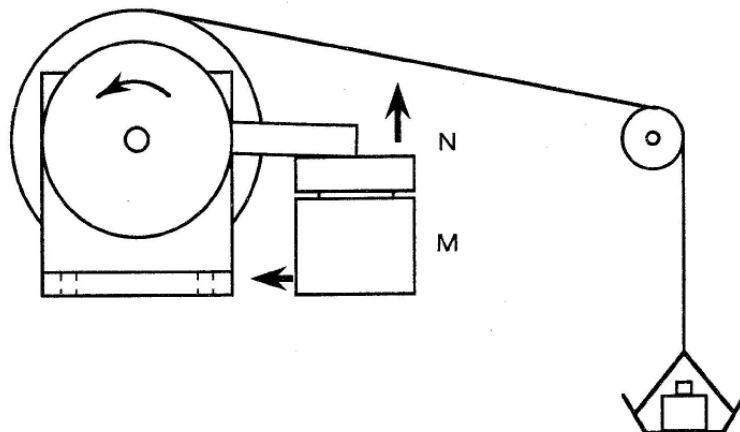


図 3-3 微動台

## 結果の整理

分銅をおもりにプーリー1の半径3.8cmをかけトルクを求める。また目盛円盤上の角変位に1/10をかけて静止トルクとロータ角度を求め、表3-1のように記録する。次に、図3-4のように横軸に角度、ロータ角度を求め、表3-1のように記録する。次に、図3-4のように横軸に角度、縦軸に静止トルクをとってプロットする。

表 3-1 実験 1 の測定結果

荷重[ $\text{gf}$ ]	トルク[ $\text{gf} \cdot \text{cm}$ ]	指針角度[ $^{\circ}$ ]	ロータ角度[ $^{\circ}$ ]
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

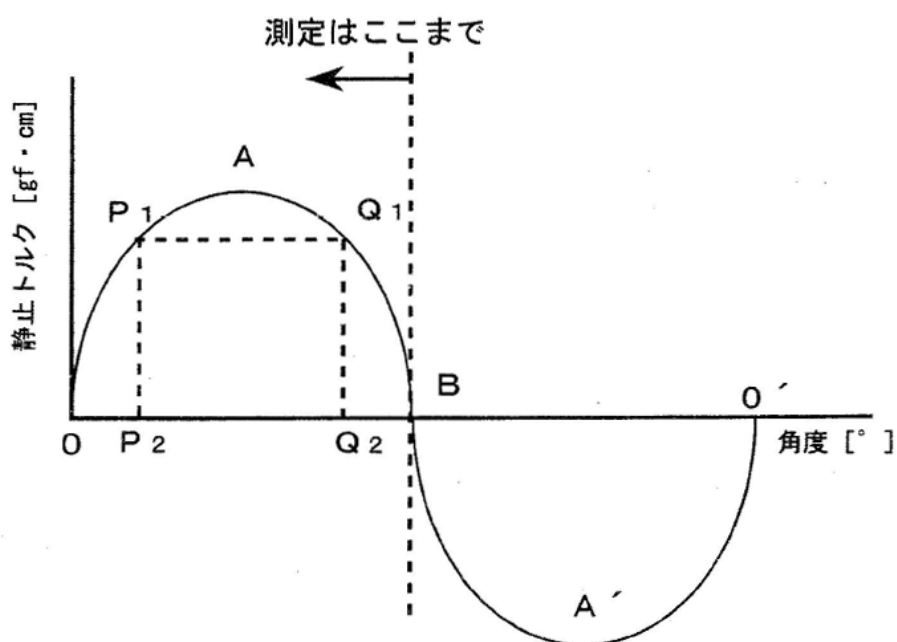


図 3-4 角度－トルク特性

## 実験 3-2 ステッピングモータの動特性の測定実験

### 実験装置

図 3-5 のように, ステッピングモータと制御装置のみの構成とする. プーリーに掛ける糸の一端は, 実験台に固定する. 発信器から TTL 出力パルスをシャーシの端子へ入力する. 励磁電流は 2 相励磁 (0.6A) にする.

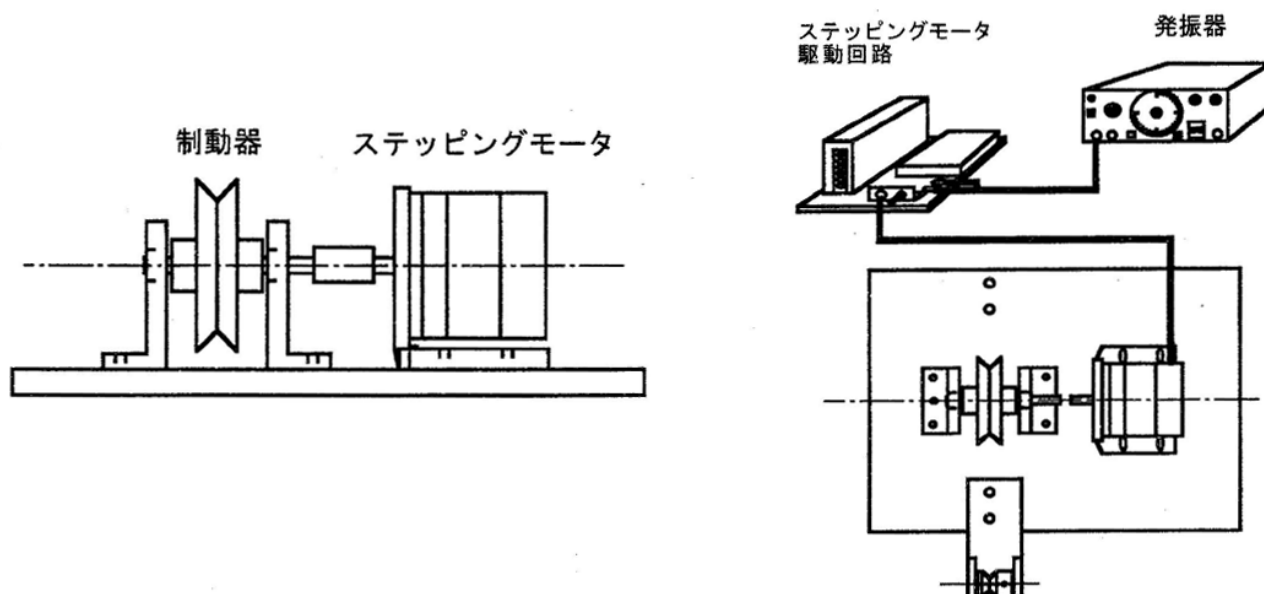


図 3-5 動特性測定の実験装置

### 実験方法

#### 1. 低パルス周波数におけるモータの挙動

プーリーの糸を外してモータを無負荷にし, パルス周波数を 1~2Hz 程度の低周波数にして, このときのロータの回転のしかたを観察する.

#### 2. 最大応答周波数の測定

- I. 分銅をのせ, 発信器のつまみをまわして徐々に周波数を上げ, ロータがパルスに同期して回転できなくなるときの周波数を記録する.
- II. 乗せる分銅の量を増やして, 同様に周波数を測定する.

#### 3. 最大自起動周波数の測定

- I. 分銅をセットし, 発信器のスタートボタンを OFF にしておく.
- II. 発信器の周波数の値を適当にセットし, スタートボタンを押したとき, ロータがパルスに同期して回転するかどうかをみる. 回転すれば周波数を少し増やし, 同様の実験を行う. このようにして, 追従する周波数の最大値を見つけ出し, 記録する.
- III. 分銅の量を増して同様の実験を行う.

## 結果の整理

2, 3 の測定結果を表 3-2 のように記録する. 次に, 図 3-6 のように横軸にパルス周波数, 縦軸に分銅の重さをプロットする.

ここでは, 片対数グラフ用紙を使うことが望ましいが, 普通の方眼紙でも構わない.

表 3-2 実験 2 の測定結果

荷重 (gf)	最大応答周波数 (Hz)	最大自起動周波数 (Hz)
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.

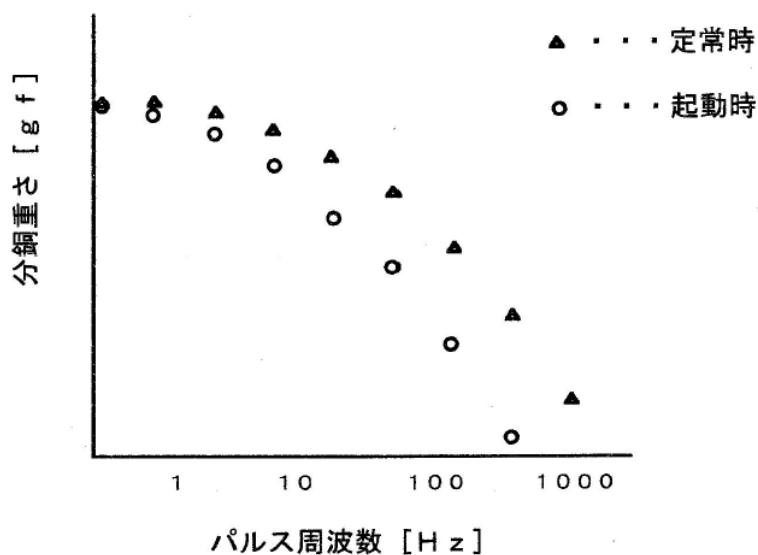


図 3-6 分銅重さ—追従周波数曲線

## 速度—トルク特性について

ステッピングモータの性能を表す代表的な特性で, 図 3-7 のように横軸がパルス周波数, 縦軸がトルクになっている (ステッピングモータの回転速度はパルス周波数に比例する). ステッピングモータの動特性の特徴は, 引き込みトルクに囲まれた自起動領域と脱出トルク—引き込みトルクに挟まれたスルー領域の 2 種類の動作領域を持っていることにある.

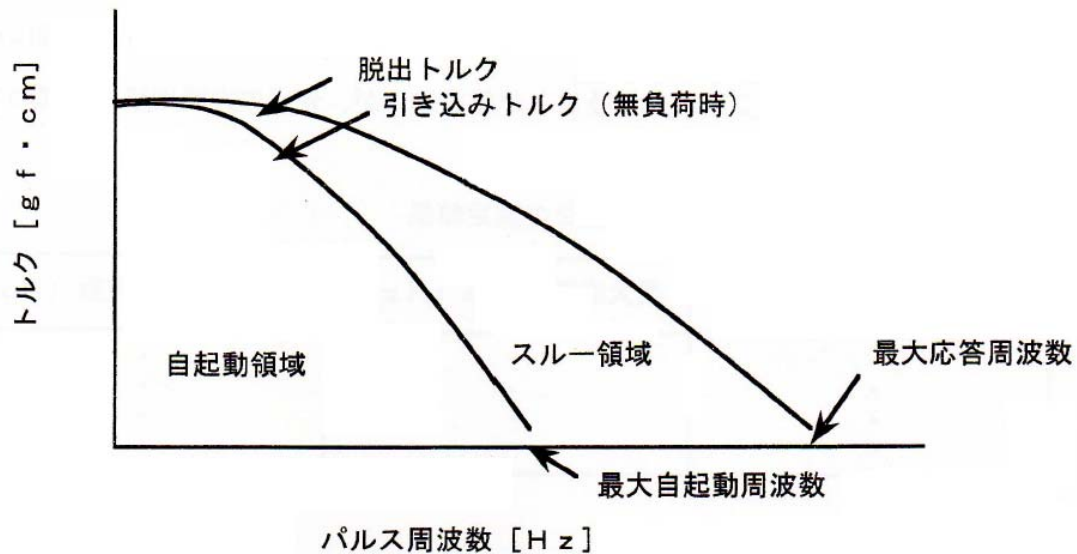


図 3-7 速度－トルク特性

### 1. 自起動領域

ステッピングモータがパルス信号に同期して起動、停止、反転できる動作領域である。停止しているモータにパルスを指令しても、あるパルス周波数を超えるとモータが起動できなくなる。このときのパルス周波数を最大自起動周波数という。

### 2. スルー領域

自起動領域を超えた高速領域をスルー領域という。ステッピングモータを使用して、高速位置決め制御を行うときには、このスルー領域を使った運転を行う。スルー領域でモータを運転するためには、パルス周波数を徐々に加速したり減速停止させる加速度運転（スローアップ・スローダウン）が必要になる。

ステッピングモータを自起動領域で起動後、徐々にパルス周波数を上げていくとモータの回転速度も比例して上がっていくが、あるパルス周波数を超えるとモータはパルス信号に追従できなくなり停止してしまう。このときのパルス周波数を最大応答周波数という。また、あるパルス周波数で同期回転しているモータに徐々に負荷トルクを加えていくと、あるトルクを超えるとモータは停止してしまう。このトルクを脱出トルクという。

## 4. ロボットアームの実験

本実験では, ROBOTIS 社の Dynamixel を用いる(図 4-1). Dynamixel は、デジタル通信で制御されるロボット専用のアクチュエータである. このアクチュエータを用いたロボットアームを本実験で扱う.



重量	54.6g
サイズ	32mm x 50.1mm x 40mm
最小制御角	約 0.29° x 1,024
停動トルク	15 kgf.cm (12V, 1.5A)
使用電圧	9~12V(推奨電圧 11.1V)

図 4-1 ROBOTIS 社の Dynamixel

### 実験 4-1 ロボットアームの手動操作におけるアクチュエータの動作特性

#### 実験装置

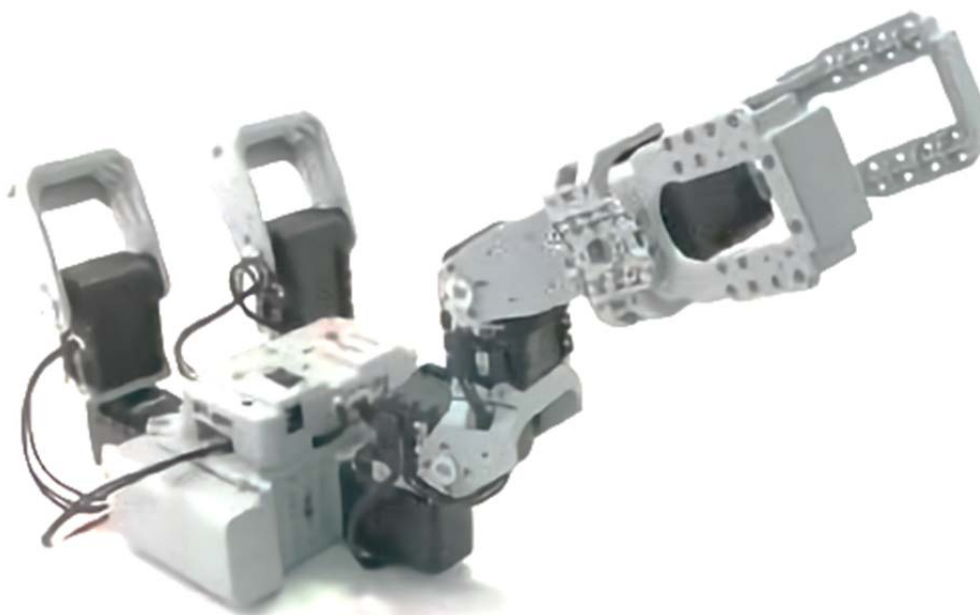


図 4-2 実験装置

図 4-2 は実験装置を示している. この実験装置は図 4-1 に示したアクチュエータを 8 つ用いて構成されている. また, 中央部には Dynamixel と周辺装置を制御するために使用されるコントローラである CM-530(図 4-3)が配置されている.



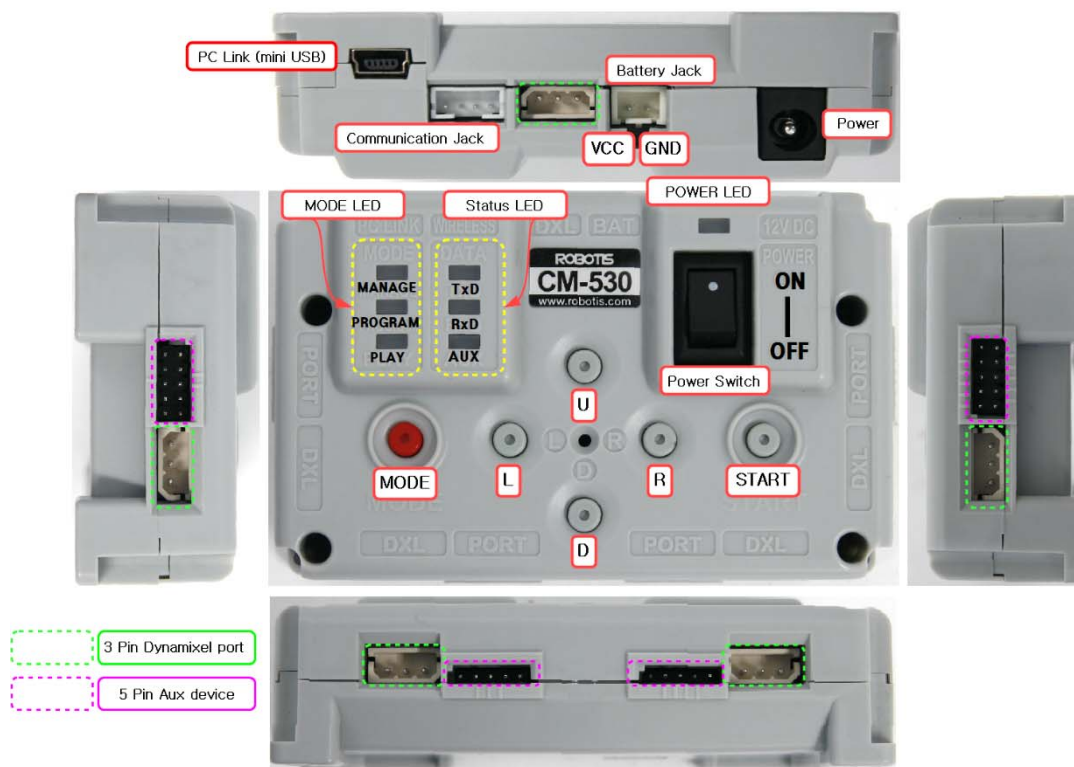


図 4-3 CM-530 の各部分の名称

#### 実験方法

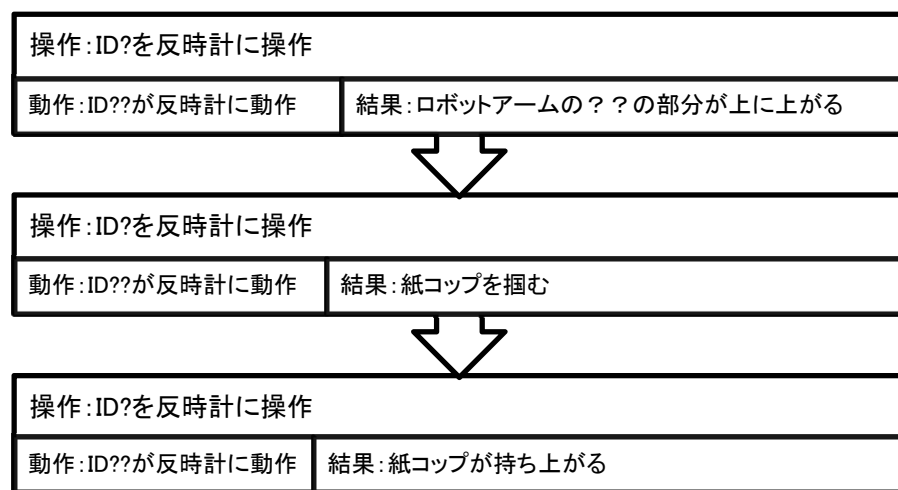
1. CM530Power Switch を ON にし, mini USB を用い PC と接続する.
2. PC デスクトップ上の【RoboPlus】をクリックし【RoboPlus Task】をクリックする.
3. 【ファイル】の【開く】から【実験 4-1】をクリックする.
4. 緑色の下向き矢印をクリックするとプログラムのダウンロードが始まる.
5. プログラムのダウンロードが終了したら mini USB を取り外す.
6. CM-530 の MODE が PLAY になっていることを確認し START を押す.

#### 結果の整理

1. ID7,ID8(右側)・ID15,ID16(左側)のアクチュエータを操作し操作した際の動作を記録する.


Ex) ID5 を操作	ID5 を反時計に操作 → ID18 が反時計に動作(動作した分の角度のみ)
ID7 を操作	
ID8 を操作	
ID15 を操作	
ID16 を操作	

2.用意された紙コップロボットアームが届く範囲に設置し持ち上げる動作を記録しなさい。また初期状態に戻してから動作を記録するため CM-530 の MODE を押し、もう一度 START を押した状態から記録を行うこととする。下記に動作の記録例を示す。




記入版(足りない場合は適宜作成すること)


操作:	
動作:	結果:




操作:	
動作:	結果:



操作:	
動作:	結果:



操作:	
動作:	結果



操作:	
動作	結果

## 実験 4-2 ロボットアームの自動操作におけるアクチュエータの動作特性

### 実験装置

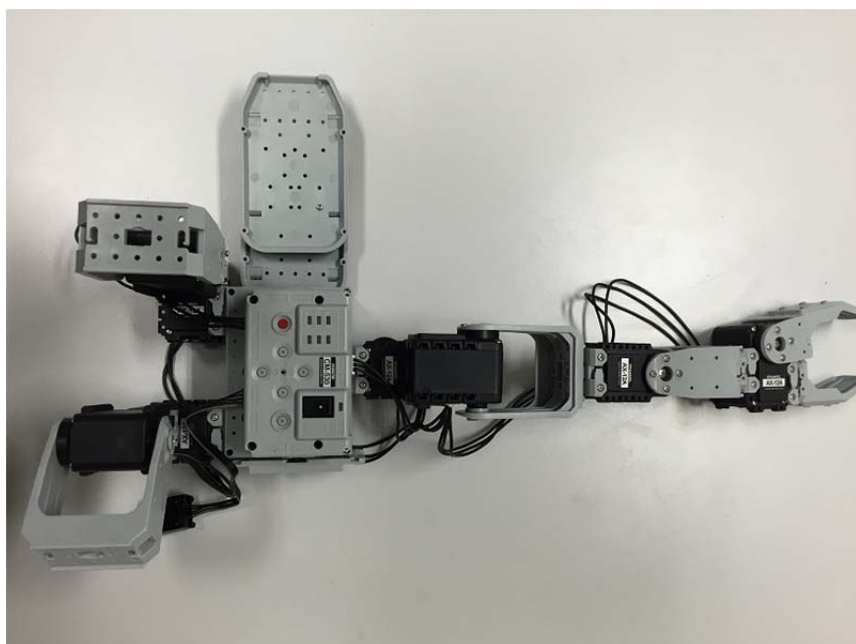


図 4-4 実験装置

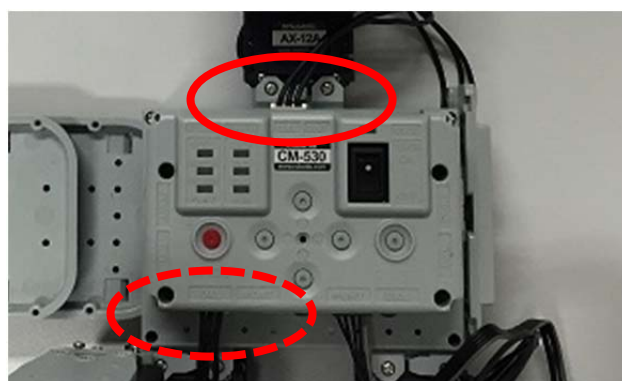
図 4-4 は実験装置を示している。この実験装置は図 4-1 に示したアクチュエータを 4 つ用いて構成されている。また、中央部には Dynamixel と周辺装置を制御するために使用されるコントローラである CM-530(図 4-3)が配置されている。

図 4-1 実験装置から図 4-4 実験装置への変更手順

1. 右図で赤く囲まれたネジ 2 つと DXL に接続されているケーブルを取り外し、実験 4-2 用のアームに取り換える。

2. 破線で囲まれた方の DXL ケーブルを取り外す。

\* 変更する際は、ケーブルや装置を壊さないように丁寧に変更を行うこと



### 実験方法

1. CM530Power Switch を ON にし、mini USB を用い PC と接続する。
2. PC デスクトップ上の【RoboPlus】をクリックし【RoboPlus Task】をクリックする。
3. 【ファイル】の【開く】から【実験 4-2】をクリックする。
4. 緑色の下向き矢印をクリックするとプログラムのダウンロードが始まる。
5. プログラムのダウンロードが終了したら mini USB を取り外す。

## 結果の整理

1. 各アクチュエータの動きを観察しまとめよ.

2. コップを置く際に異なる場所にコップを置く動作にプログラムを変更し変更箇所とその動作についてまとめよ.

#### 参考文献

- ① 小型モータ, 電気学会精密小型電動機調査専門委員会編, コロナ社, 1991
- ② 雨宮, 松井, 図解メカトロニクス入門シリーズ アクチュエータ入門, オーム社, 1983
- ③ オリエンタルモータ総合カタログ, オリエンタルモータ株式会社, 1992
- ④ 静岡大学工学部, 学生実験指導書, 1994