

E6 応用アクチュエータ制御

E6.1 はじめに

E コース第 6 回では、引き続きアクチュエータの代表としてモータを取り上げて、実験を通してその特性を理解する。はじめにモータによる位置制御を実現するサーボ機構およびサーボモータについて説明し、その一例として RC サーボを実際に駆動させてみよう。また第 5 回に製作した駆動制御回路を使用して DC モータを駆動し、制御方法の違いによるモータの挙動変化を確認すると共に、速度制御における動特性をステップ応答から同定してみよう。

本日の目標

1. サーボ機構およびサーボモータについて理解する
2. DC モータの制御方法違いによるモータの挙動変化を確認する
3. DC モータ駆動系の動特性を同定する

E6.2 サーボモータ

E6.2.1 サーボモータとは

知識 E6.1 サーボモータ

物体の位置や姿勢などを制御量とした数値制御で動作する自動制御装置のことをサーボ機構という。サーボモータは、Fig.E6.1 にそのブロック図を示すよ

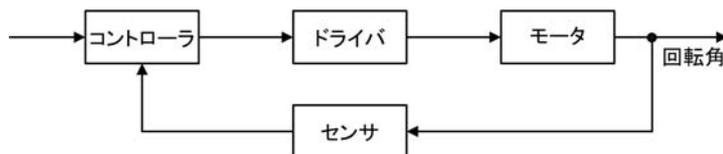


Fig.E6.1: サーボモータのブロック図

うに、コントローラがサーボアンプを解してモータを制御し、モータは制御量の状態(角度など)を計測してコントローラにフィードバックすることによって、回転角度を目標値に追従させることができるモータである。

例 E6.1 RC サーボ

RC サーボとは、DC モータ、減速ギア、ポテンショメータと制御用回路をひとつにパッケージしたアクチュエータである。ラジコンカーのステアリング駆動などに利用されており、信号線に加える PWM 信号のパルス幅(デューティ比)で回転角度が決まり、その位置を保持する。

E6.2.2 サーボモータを駆動してみよう

実験 E6.1 RC サーボを駆動してみよう

RC サーボに制御信号を入力し、実際に回転角度制御をしてみよう。

1. 手順

- (a) ファンクションジェネレータの出力信号をオシロスコープに接続し、駆動用 PWM 信号が出力されるように設定する
- (b) RC サーボの制御信号線にファンクションジェネレータの出力を、電源線にユニバーサル電源を接続する
- (c) 制御用 PWM 信号のデューティ比を変化させ、回転角が追従することを確認する

2. 注意事項

- 定格外の制御用信号を RC サーボに与えないこと

E6.3 DC モータの速度・トルク制御での慣性負荷駆動

E6.3.1 DC モータによる慣性負荷の駆動

慣性負荷を DC モータによって駆動し、トルク制御および速度制御それぞれの駆動方法における慣性負荷の速度変化を観察することによって、各制御方法に対する理解を深めよう。

知識 E6.2 慣性負荷駆動における運動方程式

Fig.E6.2 に示すように、モーメント J を持った慣性負荷をモータが発するト

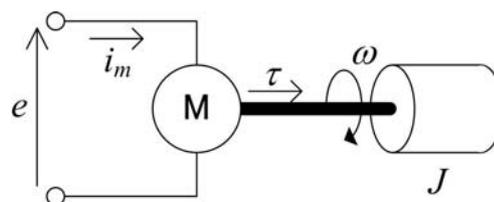


Fig.E6.2: DC モータによる慣性負荷駆動の模式図

ルク τ で駆動するときの運動方程式は、 ω を回転角速度とすると式 (E6.1) によって表すことができる。

$$\tau = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{E6.1})$$

式 (E6.1) より慣性負荷の角速度 ω は式 (E6.2) によって表すことができ、トルクが積分された値に比例して角速度が決定することになる。

$$\omega = \frac{1}{J} \int \tau dt \quad (\text{E6.2})$$

知識 E6.3 トルク・速度制御による慣性負荷の駆動

慣性負荷の駆動におけるトルク制御および速度制御とは、式 (E6.2) 中のモータ発生トルク τ あるいはモータ回転速度 ω を一定に制御することを意味する。

トルク制御 内部の微小な影響を省略すると、DC モータが発するトルク τ は電機子電流値 i_m に比例することになるので、その関係は式 (E6.3) で表される。

$$\tau = k_t \cdot i_m \quad (\text{E6.3})$$

すなわちトルク制御では、電機子電流を一定に制御すればよいことを意味しているといえる。さらに式 (E6.2) と式 (E6.3) から、

$$\omega = \frac{k_t}{J} \int i_m dt \quad (\text{E6.4})$$

が導出できるので、慣性負荷の角速度は一定値をとる電機子電流値の積分結果に比例して決まることになる。

速度制御 負荷を一定とみなせばモータの回転角速度 ω は電機子電圧 e に比例し、式 (E6.5) で表すことができる。

$$\omega = k_v \cdot e \quad (\text{E6.5})$$

ゆえに速度制御とは DC モータへの電機子電圧が一定になるように制御する方法であると言い換えることができる。式 (E6.4) と式 (E6.5) から、

$$e = \frac{k_t}{k_v \cdot J} \int i_m dt \quad (\text{E6.6})$$

が導出されるので、実際には電機子電圧 e が一定値を取るように電機子電流 i_m を制御することになる。

E6.3.2 等価回路による仮想慣性負荷の実現

知識 E6.4 機械機構の等価回路

機械機構における回転速度 (速度) ω 、トルク (力) τ を、それぞれ電気回路における電圧 v 、電流 i へ置き換えると、機械機構の各要素に関する等価回路は以下のように関連付けることができる。

粘性負荷 機械機構での粘性負荷は、電気回路では Fig.E6.3 に示すように抵抗によって置き換えることができる。これはダンパなどを例に考えてみると理解しやすく、ダンパは摩擦によってエネルギーを消費し振動を減衰させるので、電気回路においてはエネルギーを消費するための素子である抵抗が対応することになる。これらが無いと減衰が起こらず、永久に振動しつづけることになる。

弾性負荷 機械機構での弾性負荷は、電気回路では Fig.E6.3 に示すようにコイルによって置き換えることができる。コイルには電流が流れると逆起電力が生じるが、これは力が加わると反発力を生じるバネに代表されるように対応関係は明確で、コイルが無いと振動回路が構成できないことから理解できる。直流は通すが交流は遮断するという特徴も一致している。

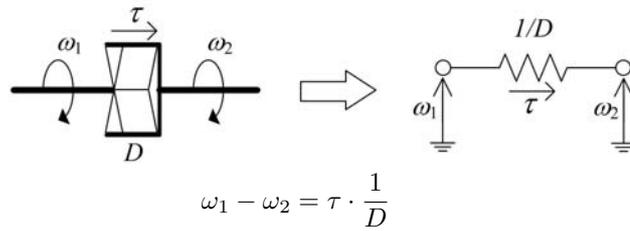


Fig.E6.3: 粘性負荷の等価回路

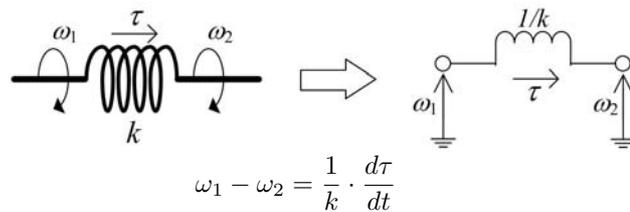


Fig.E6.4: 弾性負荷の等価回路

慣性負荷 機械機構での慣性負荷は，電気回路では Fig.E6.3 に示すようにコンデンサによって置き換えることができる．運動方程式から速度は力の積分値に

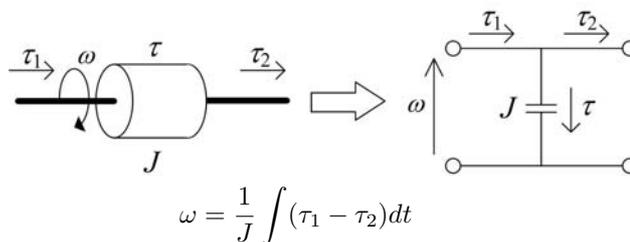


Fig.E6.5: 慣性負荷の等価回路

比例することは明らかであるが，コンデンサの極板間電位が電流の積分値に比例することと照らし合わせると理解は容易である．

知識 E6.5 モータ実験装置における仮想慣性負荷の実現

Fig.E6.6 に示したように，駆動側と全く同一の DC モータをジェネレータとして利用することで，駆動側モータが発するトルク・回転速度をそれぞれ電流・電圧値に逆変換して取り出す．さらにその変換信号を利用して電氣的な慣性負荷を駆動することにより，慣性負荷を組み込んだモータ実験装置を仮想的に実現する．コンデンサの静電容量が負荷の慣性モーメントに相当し，コンデンサの極板間電圧が負荷の回転速度に相当することになる．

E6.3.3 速度制御・トルク制御による慣性負荷の駆動

仮想的に慣性負荷を組み込んだモータ実験装置に対して，トルク制御および速度制御によって負荷を駆動させ，制御方法の違いによる慣性負荷の速度変化を

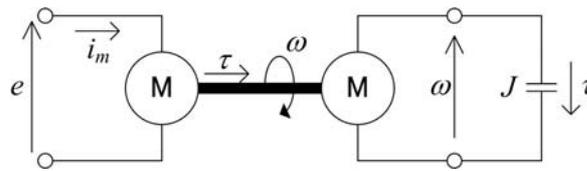


Fig.E6.6: 仮想慣性負荷を組み込んだのモータ実験装置の構成

観察し、それぞれの制御方法の特徴を理解しよう。

事前課題 E6.1 回転速度波形を予測してみよう

トルク制御および速度制御によって初速ゼロから負荷を駆動するときの、回転速度波形の概形をそれぞれ予測しなさい。

実験 E6.2 トルク制御による慣性負荷の駆動

トルク制御によって慣性負荷を駆動し、その回転速度変化の様子を観察する。

1. 手順

- トルク制御用モータ駆動制御回路を構成し、電源電圧供給および制御電圧 V_{ref} 用の配線を接続する
- Fig.E6.7 を参照して駆動用 DC モータを Hブリッジ回路にスイッチを介して接続すると共に、ジェネレータ用モータの端子間には（コンデンサではなく）オシロスコープを接続する
- モータを駆動させ、ジェネレータの出力電圧が 4V 程度となるような V_{ref} の値を設定する
- モータを一旦停止させ、ジェネレータ用モータの端子にコンデンサを接続する
- (c) で定めた V_{ref} によって負荷を駆動し、コンデンサの極板間電圧波形（慣性負荷の速度波形に相当）の変化の様子を観察する
- V_{ref} の値を小さくして負荷を駆動し、同様にコンデンサの極板間電圧波形の変化を観察する

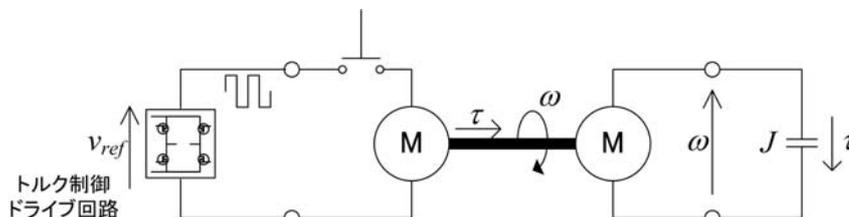


Fig.E6.7: トルク制御用モータ実験装置の構成

2. 考察項目

- 負荷の回転速度波形はどのような概形となるか観察し、その理由を考察しなさい

- V_{ref} を変化させたときの負荷の回転速度波形が、どのような変化をするか観察しなさい

3. 注意事項

- コンデンサを回路に組み込む際には、ジェネレータから発生する電圧の方向に注意して接続すること
- 負荷駆動実験を再度行う場合には、コンデンサに蓄えられた電荷が一旦放電されてから実施すること

実験 E6.3 速度制御による慣性負荷の駆動

速度制御によって慣性負荷を駆動させ、その速度変化の様子を観察する。

1. 手順

- 速度制御用モータ駆動制御回路を構成し、電源電圧供給および制御電圧 V_{ref} 用の配線を接続する
- Fig.E6.8 を参照して駆動用 DC モータを H ブリッジ回路にスイッチを介して接続すると共に、ジェネレータ用モータの端子間には (コンデンサではなく) オシロスコープを接続する
- モータを駆動させ、ジェネレータの出力電圧が 4V 程度となるような V_{ref} の値を設定する
- モータを一旦停止させ、ジェネレータ用モータの端子にコンデンサを接続する
- (c) で定めた V_{ref} によって負荷を駆動し、コンデンサの極板間電圧波形 (慣性負荷の速度波形に相当) の変化の様子を観察する
- V_{ref} の値を小さくして負荷を駆動し、同様にコンデンサの極板間電圧波形の変化を観察する

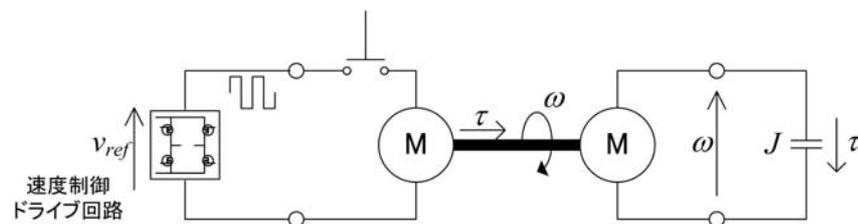


Fig.E6.8: 速度制御用モータ実験装置の構成

2. 考察項目

- 負荷の回転速度波形はどのような概形となるか観察し、その理由を考察しなさい
- V_{ref} を変化させたときの負荷の速度波形が、どのような変化するか観察しなさい

- 負荷の回転速度波形は，トルク制御の場合と比較してどのように異なるのか観察し，その理由を考察しなさい

3. 注意事項

- コンデンサを回路に組み込む際には，ジェネレータから発生する電圧の方向に注意して接続すること
- 手順 (c) においてジェネレータ出力が上がらない場合にも， v_{ref} が 5V を越えないよう注意すること
- 負荷駆動実験を再度行う場合には，コンデンサに蓄えられた電荷が一旦放電されてから実施すること

E6.4 DC モータ実験装置の動特性同定

DC モータによる回転角度制御系の設計を念頭に置き，制御対象となる DC モータ実験装置の動特性として，入力信号である電機子電圧から出力信号となるポテンシオメータの角速度までの伝達関数を同定しよう．

E6.4.1 DC モータのモデル化

知識 E6.6 DC モータの伝達特性

まず DC モータの運動方程式として，式 (E6.7) が成り立つ．

$$(J_m + J_l) \cdot \frac{d\omega}{dt} = k_t \cdot i_m - \tau_f \quad (\text{E6.7})$$

またモータ内部の電気回路に関しては，式 (E6.8) が成り立つ．

$$e - K_e \cdot \omega = R \cdot i_m \quad (\text{E6.8})$$

ここで，式中の各パラメータは以下の通りである．

J_m	: 電機子の慣性モーメント
J_l	: 負荷の慣性モーメント
k_t	: トルク定数
τ_f	: 摩擦トルク
K_e	: 逆起電力定数
R	: 電機子抵抗
ω	: 回転角速度
e	: 電機子電圧
i_m	: 電機子電流

式 (E6.7)，式 (E6.8) を基にして DC モータの電機子電圧 e から回転角速度 ω までのブロック線図を構成すると，Fig.E6.9 のようになる．

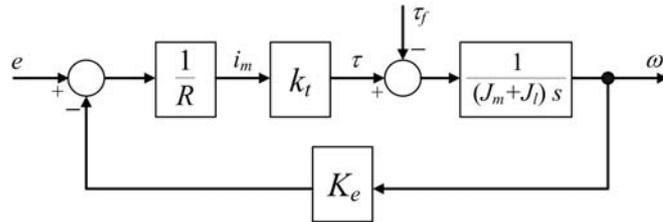


Fig.E6.9: DC モータのブロック線図

Fig.E6.9 のブロック線図あるいは式 (E6.7) と式 (E6.8) より, DC モータの電機子電圧 e から回転角速度 ω までの伝達関数を求めると, 式 (E6.9) が得られる.

$$F(s) = \frac{\omega(s)}{e(s)} = \frac{K}{1 + T_m s} \quad (\text{E6.9})$$

$$\text{ここで, } T_m = \frac{(J_m + J_l) \cdot R}{k_t K_e}, \quad K = \frac{1}{K_e} \quad \text{である}$$

この結果から, DC モータの動特性は 1 次遅れによって近似することが可能であることがわかる.

事前課題 E6.2 DC モータの伝達関数導出

Fig.E6.9 のブロック線図あるいは式 (E6.7) と式 (E6.8) から, 式 (E6.9) に示した DC モータの伝達関数を導出しなさい.

E6.4.2 DC モータ実験装置の伝達関数

知識 E6.7 DC モータ実験装置の伝達関数

DC モータ実験装置では, 駆動軸に直接ジェネレータが接続され, さらに駆動軸から減速機構を介してポテンシオメータが接続されている. ジェネレータ等の慣性モーメントあるいは摩擦トルクは, 式 (E6.7) 中に J_l, τ_f としてすでに考慮されている. したがって, FigE6.10 にブロック線図を示すように, 回転

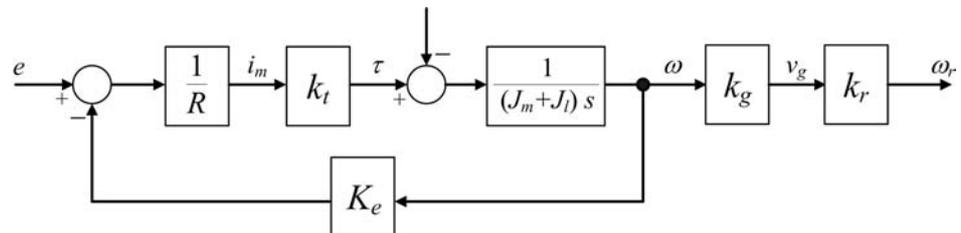


Fig.E6.10: DC モータ実験装置のブロック線図

角速度 ω の先にジェネレータによるゲイン K_g および減速機構によるゲイン K_r を付加したものが, DC モータ実験装置のブロック線図となる.

したがって DC モータ実験装置の伝達関数は

$$G(s) = K_r \cdot K_g \cdot F(s) = K_r \cdot K_g \cdot \frac{K}{1 + T_m s} \quad (\text{E6.10})$$

と、同じく 1 次遅れ系で記述されることになる。

E6.4.3 DC モータ駆動系の伝達関数同定

DC モータ駆動系の伝達関数を、電機子電圧 e からジェネレータ出力電圧 v_g までの 1 次遅れ系、およびジェネレータ出力電圧からポテンシオメータ角速度 ω_r までのゲインに分離して同定しよう。

実験 E6.4 電機子電圧からジェネレータ出力電圧までの伝達関数同定

電機子電圧 e からジェネレータ出力電圧 v_g までの動特性を、1 次遅れ系の伝達関数としてモデル化して同定することによる。

1. 手順

- (a) 速度制御用モータ駆動制御回路を構成し、電源供給および制御電圧 V_{ref} 用の配線を接続する
- (b) Fig.E6.11 を参照して駆動用 DC モータを H ブリッジ回路に接続すると共に、ジェネレータ用モータの端子間にはオシロスコープを接続する

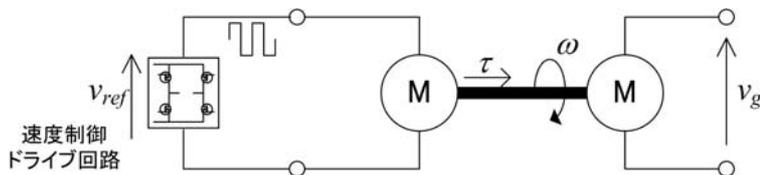


Fig.E6.11: 伝達関数同定用モータ実験装置の構成

- (c) モータを駆動し、ジェネレータの出力電圧が 4V 程度となる V_{ref} の値を同定する
- (d) ファンクションジェネレータの出力信号を、周波数 0.5Hz、2.5V と (c) で同定した V_{ref} 間で ON-OFF する矩形波に設定する
- (e) (d) で設定した矩形波を v_{ref} に入力してモータを駆動させ、ステップ応答波形であるジェネレータの出力電圧波形を観測して伝達関数を同定する
- (f) V_{ref} 用の矩形波の振幅値を 1/2 にして同様にモータを駆動し、ジェネレータの出力電圧波形を観測して伝達関数を同定する

2. 考察項目

- 1 次遅れ系の伝達関数パラメータを同定しなさい
- V_{ref} を変化させたときの伝達関数に、パラメータの変化がないか確認しなさい

事前課題 E6.3 ステップ応答波形からの動特性同定法

ステップ応答波形から, 1 次遅れ系の伝達関数パラメータ (ゲインおよび時定数) を同定する方法を考えなさい.

実験 E6.5 ジェネレータ出力電圧からポテンシオメータ角速度までのゲイン同定

ジェネレータ出力電圧 v_g からポテンシオメータ角速度 ω_r までの動特性を, ゲインとしてモデル化して同定することしよう.

1. 手順

- (a) 速度制御用モータ駆動制御回路を構成し, 電源供給および制御電圧 V_{ref} 用の配線を接続する
- (b) Fig.E6.12 を参照して駆動用 DC モータを H ブリッジ回路に接続すると共に, ジェネレータ用モータの端子間にオシロスコープを接続する

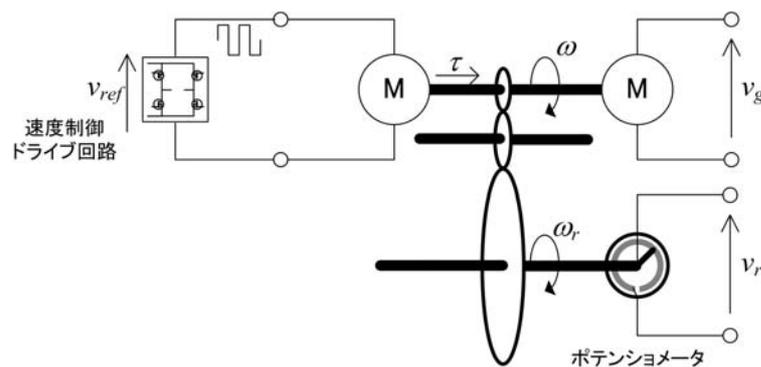


Fig.E6.12: ゲイン同定用モータ実験装置の構成

- (c) ポテンシオメータの固定抵抗間の端子に 5V を印加し, 出力端子にはオシロスコープを接続する
- (d) V_{ref} を適当な値に設定してモータを駆動し, ジェネレータの出力電圧値を計測する
- (e) そのときのポテンシオメータの角速度をオシロスコープの波形から観測し, ジェネレータ出力電圧 v_g からポテンシオメータ角速度 ω_r までのゲインを同定する
- (f) V_{ref} の値を変更して, 同様の同定を行う

2. 考察項目

- 複数の v_{ref} によって同定されたゲインに, 変化が無いか確かめなさい