

仙台市/仙台市産業振興事業団
 ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー
 第8回 C08/Rev 1.0

モータの基礎

仙台市地域連携フェロー
 熊谷正朗
 kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
 ロボット開発工学研究室 **RDE**

今回の目的

- モータの基礎
 - テーマ1: モータの役割とその種類
 - ・モータとその特徴
 - ・モータの種類
 - テーマ2: モータの活用
 - ・モータの使い方
 - ・モータの選定
 - ・モータの特性と制御

C08 モータの基礎 Page. 2 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの役割

- アクチュエータ≒モータ
 - ・コンピュータの指示で動きを生み出す要素。
 - ・**アクチュエータ**には多くの種類があるが、多くの場合は**電磁式のモータ**。

C08 モータの基礎 Page. 3 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの役割

- アクチュエータ≒モータ
 - ◇ モータの一般的特徴（後に詳述）
 - ・**電力**を与えると軸が回転する。
 ※油圧、空気圧を与える物などもある
 ※直線運動するものもある(リニアモータ)
 - ・**電磁石**をもとにした原理で動く。
 ※その他様々な原理のものがある
 - ・出せるトルク(力)と速度に上限がある。
 ※独立した制限or密に関連した制限

C08 モータの基礎 Page. 4 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

- 与えるエネルギーによる分類
 - ◇ 電力（電圧&電流）
 - ・電磁式モータ（主流、電流主体or電圧主体）
 - ・超音波モータ（電圧主体）
 - ・静電気力モータ（電圧主体）
 - ◇ 流体圧力（圧力&流量）
 - ・油圧モータ（※建機の走行部分）
 - ・空気圧モータ（※歯科のドリル）

C08 モータの基礎 Page. 5 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

- 電力で動作するモータ
 - ◇ 電磁式モータ
 - ・永久磁石、電磁石、コイルなどを用いた、磁気と電流の関係、磁力の吸引反発を用いて動作するモータ。
 - ・直流モータ
 - ・交流モータ
 - ・ステッピングモータ など

C08 モータの基礎 Page. 6 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

- 電力で動作するモータ
 - ◇ 超音波モータ
 - ・電圧で変形する圧電素子を利用。
 - ・高い周波数(数十kHz等)で素子を振動させ、その振動を回転運動などに機械的に変換。
 - ・出力は大きくないが、**薄型化可能**、**リング状**に作れるなど形状が比較的**自由**、**などの特徴により、特殊用途に使われる。**

大島商船高等サイトより

C08 モータの基礎 Page. 7 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

- 電力で動作するモータ
 - ◇ 静電気力モータ
 - ・静電気の引力で回転するモータ。
 - ・“日常的な大きさ”では実用的ではないが、MEMS(μm サイズ)では磁力より有望。
 ※大型大出力品の試作品もある
 - ・回転式よりも直動のものが、センサを含め様々なものに利用されている。
 ※角速度、加速度センサ、プロジェクタ

東京大学サイトより

C08 モータの基礎 Page. 8 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流モータ

- ・ **直流の電力**で回転するモータ。
- ・ **ステータ**(固定子): 永久磁石が多い
- ・ **ロータ**(回転子): 電磁石
- ・ 電磁石の磁極を適切に切り替えるための **ブラシと整流子**がある。
- ・ 一般的に配線は2本(+アース1本)。

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流モータ (汎用)

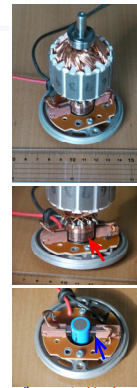


外観



ステータ

ロータ



ブラシと整流子

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流モータ

- ・ **直流電流**を流すと**トルク**(回転する力)が生じる。
※直流電圧をかけると回る、は副次的
- ・ 利点: 制御方法、回路が比較的簡単
- ・ 欠点: ブラシの寿命、ノイズ
- ・ 代表例: 模型用小型モータ、
自動車機器用モータ

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流(DC)サーボモータ

- ・ サーボ制御に使うことを念頭にしたモータ。
- ・ なめらかに回る/センサ付が多い。
※ロータリーエンコーダ等



110W

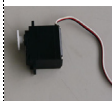


モータの種類

○ サーボモータ と ラジコンサーボ

◇ ラジコンサーボ

- ・ ラジコン模型に用いられていたユニットで、**モータ**、**電子回路**を内蔵し、コントローラの操作に応じて軸が回転する。
- ・ 電源と指令信号線のみで指定した角度に回転するため、小型のロボットの部品などに、使われるようになってきた。



モータの種類

○ サーボモータ と ラジコンサーボ

◇ 用語の混同

- ・ もとは「ラジコンサーボ」と呼ばれていたが、最近、「サーボモータ」と呼ぶ例が増加。
→ 本来の「(DC,AC)サーボモータ」と混乱するケースが多く見られるように。
- ・ 構造も用途も全く異なるため、「サーボモータ」という記述を見た場合には要注意。



モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 交流モータ

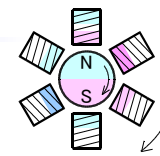
- ・ **交流電力**で回転するモータ。
- ・ **同期型**交流モータ
周波数に連動した回転速度
- ・ **非同同期型**交流モータ
周波数に連動しない回転速度
※周波数の影響を強くうけるは多い
- ・ 一般に直流モータより簡単・コンパクト。

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 同期交流モータ

- ・ **ロータ**が磁極固定の**磁石**、**ステータ**の**電磁石**で**回転する磁界**が生じて、それにつられて回る。
- ・ 周波数に比例した速度で回転する。
※比例係数は構造で決定される
- ・ 回転速度を変えるには周波数を変える必要がある(インバータ装置)。
※スイッチオンで回らない可能性がある



モータの種類

○ 電磁モータの種類

- ◇ 交流サーボモータ
 - ・制御用に作られた永久磁石同期モータ。
 - ・専用のサーボアンプ(制御インバータ)によって、回転が精密に制御される。

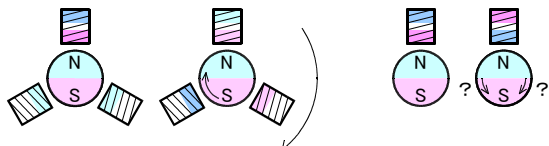


山洋製 モータ+センサ サーボアンプ 配線の例
C08 モータの基礎 Page. 17 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 単相交流と三相交流

- ◇ 単相=2本線 三相=3本線時間差
 - ・三相は3系統の電磁石で回る方向がほぼ決定されるが、単相は決まらない場合あり。



C08 モータの基礎 Page. 19 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

- ◇ 交流モータ補足
 - ・同期モータで永久磁石の代わりに電磁石を用いる物もある
→回転部分に電力を伝える接触部がある
 - ・直流モータと同原理で、永久磁石にかえ、電磁石(極性が変わる)を用いた物もある。
(交流モータでブラシ付のもの、周波数依存なし)

C08 モータの基礎 Page. 21 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

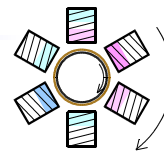
- ◇ ステッピングモータ (パルスM~, ステップM)
 - ・電流を流しただけでは回らず、**電流を切り替えることで一定角度ずつ回転**するモータ。
 - ・切り替えの回数・順序・タイミングのみで、**指定角度、速度で回す**ことができるため、メカトロで多用されている。

C08 モータの基礎 Page. 23 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

- ◇ 誘導モータ (非同同期型)
 - ・ロータが銅と鉄のみで、**磁石を持たない**。
 - ・**回転する交流磁界**で銅に**誘導電流**が生じる
→誘導電流と回転する磁界の相互作用でロータが回転する。
 - ・構造が簡単で低コスト・堅牢。
 - ・ある程度、回転磁界に遅れて回る。



C08 モータの基礎 Page. 18 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 単相交流と三相交流

- ◇ 単相=2本線 三相=3本線時間差
 - ・交流モータは回転する磁界につられて回る。
 - ・三相交流の場合は電磁石を並べるのみで回転する磁界ができる。
 - ・単相交流の場合は押し引き→所定の方向の回転になるような、細工が必要。
例)補助の電磁石とコンデンサ

C08 モータの基礎 Page. 20 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

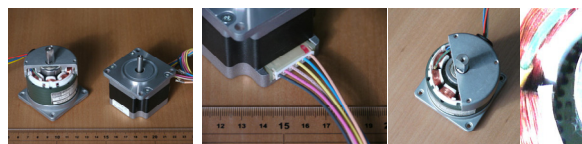
- ◇ DCブラシレスモータ
 - ・同期型の**交流モータ**に交流電流を流すための**回路(インバータ)をセット**にしたもの。
 - ・**外見では直流電力で回るモータ**。
(直流モータはブラシ付が基本→「ブラシレス」)
 - ・パソコンなどのファンなど。
 - ・商品名が「DCブラシレス」な交流モータもある。

C08 モータの基礎 Page. 22 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

- ◇ ステッピングモータ
 - ・ステータが複数の電磁石で構成される。
 - ・電磁石ごとにON/OFFする→配線が多い。



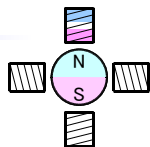
日本電産サーボ他 2個とも1.8度単位(1回転200分割)で回転
C08 モータの基礎 Page. 24 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ ステッピングモータ

- ・同期モータと原理に近いが、連続回転が主体の交流モータに対して、ステッピングモータは1ステップずつの回転を重視。
- ・別途センサを用意することなく、思い通りの回転をさせることができる。
- ・「脱調」すると回転が停止する。
脱調＝電磁石の切り替えについて行けなくなる現象



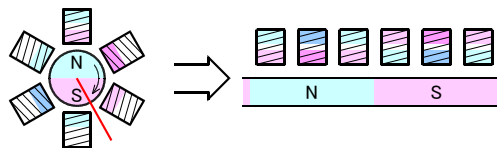
モータの種類

○ リニアモータ

◇ 直線的に動くモータ

- ・回転式の(交流/ステッピング)モータを切り開いて、直線的に動くようにしたもの。

例)



モータの種類

○ リニアモータ

◇ 直線的に動くモータ

- ・リニアモータの例

リニア同期モータ (使用例: 工作機械)
 リニア誘導モータ (使用例: 地下鉄東西線)
 リニアステッピングモータ (使用例: 産業機器)
 リニア超音波モータ

※回転モータ+メカで直動するものもあるが、
 ※リニアアクチュエータであって、リニアモータではない。



今回の目的

○ モータの基礎

テーマ1: モータの役割とその種類

- ・モータとその特徴
- ・モータの種類

テーマ2: モータの活用

- ・モータの使い方
- ・モータの選定
- ・モータの特性と制御

モータの使い方

○ モータの性能

◇ 主な性能

- ・回転速度 [rpm] ※rpm=回転/分
定格回転速度、無負荷回転速度など
- ・トルク [Nm, kgcm] ※[力][長さ]の単位
回転する力の大きさ (次で詳しく説明)
- ・電圧、電流
標準的な使い方するとき / 限界値
軸を固定したときに流れる電流など

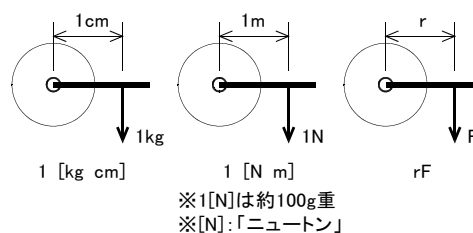
モータの使い方

○ モータの性能

◇ トルク

(負荷トルク)

- ・軸を回転させる力 (軸の回転を妨げる力)



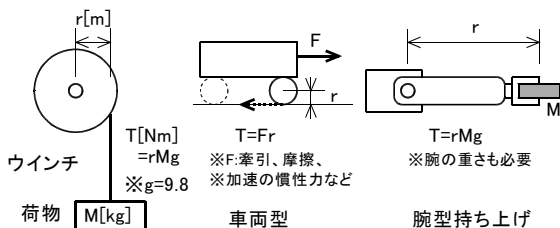
※1[N]は約100g重
 ※[N]:「ニュートン」

モータの使い方

○ モータの性能

◇ トルク

- ・具体的な用途でみるトルク



モータの使い方

○ モータの性能

◇ 性能の制限

- ・トルクの最大値＝電流の最大値
 - ・温度上昇による焼損、劣化防止(積算)
 - ・電磁石の強力な磁場による、永久磁石の劣化(瞬間)
- ・回転速度の制限:
 - ・ベアリング等のメカ的耐久、寿命
 - ・遠心力による膨張などの影響

モータの使い方

○ モータの性能

◇ 主な性能

- ・ 動力/出力 [W]
トルク[Nm] × 回転速度[rad/s] = [W]
力[N] × 速度[m/s] = [W]
電圧[V] × 電流[A] = 電力[W]
※[rpm] → (÷ 60 × 6.28) → [rad/s]
- ・ 電力[W] → 変換効率(モータ) → 動力[W]
動力[W] → 変換効率(メカ) → 動力[W]

モータの使い方

○ モータと目的の性能のミスマッチ

◇ 一致する物が見つからない

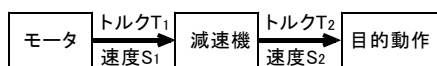
- ・ 多くのモータは
「回転は速いが、トルクが少ない」
- ・ 多くの用途は
「トルク・力は必要だが、速度はいらない」
- ・ 用途のトルクを満たそうとするとかなり大きなモータが必要になる。
→ **変速機**(ギアボックス)を用いる。

モータの使い方

○ モータと目的の性能のミスマッチ

◇ 変速機

- ・ 速度と力の取引



$$T_1 \times S_1 (\times \text{効率}) = T_2 \times S_2 \quad [W]$$

- ・ 減速機は**速度を落とす**代わりに**トルクを大きく**できる。
- ・ 機構によって直線運動に変えることもある。

モータの使い方

○ 減速機の活用

◇ モータは一般的には減速機とセットで使う

- ・ ミスマッチの解消。
- ・ 運動の変換(回転モータ → 直線運動)
- ・ モータを決めるときには[W]を基準にすると検討しやすい(効率100%なら[W]が維持される)。
- ・ 減速機は方式が様々あるため、実はその選定/設計がモータよりも大変。
→ 減速機付、メカ付のモータも市販される

モータの使い方

○ モータへの電力供給

◇ モータの種類、使い方大きく変わる

- ・ ただ回すだけ → しかるべき電源
- ・ 交流モータの変速運転
→ インバータを併用
- ・ サーボモータ → 専用の制御装置
- ・ ステッピングモータ → 制御装置、自作の切り替え回路(マイコン等使用)

モータの選定

○ 必要なモータ出力の見積もり

◇ トルク/速度/動力

- ・ **動かしたいものに必要なトルク&回転速度、力&速度を見積もる**(→ 動力)。
- ・ 大まかに**モータに必要な動力**を見積もる。(減速機、メカの効率を想定)
- ・ モータの**選択幅が決まる**。(種類によってはその出力がないことあり)

モータの選定

○ モータの種類を選択

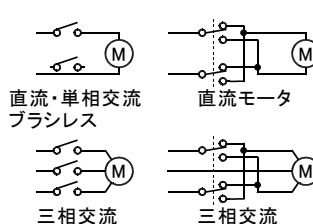
◇ ただ回す場合

- ・ 主に、出力とコストで考えればよい。
- ・ オンオフだけか、回転方向を変えるか、速度を変えるかどうか。
- ・ モータによって減速機が変わるため、減速機のコスト・大きさなども合わせて。

モータの選定

○ モータの種類を選択

◇ ただ回す場合



直流モータを逆回転させるには、配線を交換するようなスイッチ回路をつくる。
三相交流モータは3本のうち2本を交換すると逆回転する。
単相交流は配線交換では逆転しないものが多い。
DCブラシレスも不可(逆転用の制御端子の場合有)

モータの選定

○ モータの種類を選択

◇きっちり回す場合

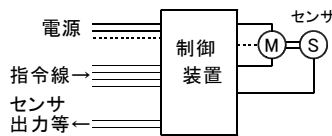
- ・ **専用の制御装置**を併用するなら、モータの方式はあまり問わない。セットのコストや、制御装置の使い勝手のほうが重要。
- ・ 制御部を内製するなら、直流モータ、ステッピングモータが無難。
(どちらも簡単な回路でそこそこ回せる)



モータの選定

○ モータの種類を選択

◇制御装置を使う場合



制御装置とモータおよびセンサを直結する。
制御装置に供給する電源は、モータの交直とは関係ないが、一般にモータ電圧より高い。
指令はパルス、電圧、情報通信(シリアル、USB他)などの形式がある。角度、正転逆転、速度、トルクなど。

モータの選定

○ モータの大きさの選定

◇必要最低限

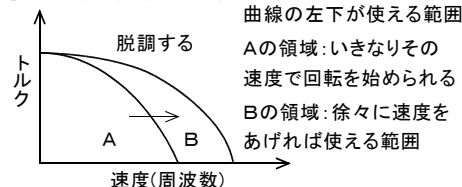
- ・ 大きすぎるモータはコスト増。
さらに重く大きくなるため、それが原因でより大きなモータが必要になることが多い。
(余裕は必要:動力見積の甘さ対策)
- ・ モータ仕様の **定格**と**最大(絶対、瞬時)**:
定格: 連続して使って良い範囲
最大: 短時間なら出せる範囲(定格より大)

モータの選定

○ ステッピングモータの場合

◇速度とトルクの関係

- ・ ステッピングモータは**脱調**しない範囲で使うように選定する。



モータの選定

○ その他留意点

◇制御装置を購入する場合

- ・ 制御装置の電源条件
- ・ 制御装置の入出力

◇モータの機械的特性

- ・ 軸にかけられる力の上限
- ・ ギアヘッド付の場合は軸のでる位置
- ・ 形状 (特に配線の出入り)



モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇直流モータの数式的に綺麗な入力**電流**

- ・ **[モータのトルク]=[トルク定数]×[電流]**
モータの**トルク**を調整したいときはモータの**電流**を調整する。

→「モータの制御回路」はモータの特性に対応した電流制御回路の場合が多い。

- ※電磁石の磁力は電流に比例する
- ※磁界の中で電線が受ける力も電流に比例する

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇直流モータの電圧の式

- ・ **[モータに加えた電圧]=**
[モータの電気抵抗]×[電流]+
[起電力定数]×[回転速度]
※コイルとしての性質(インダクタンス)を省略
※電気抵抗=巻き線の抵抗+ブラシ接触抵抗

- ・ 電圧が一定の場合:
回転が速くなると電流(トルク)が減る

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

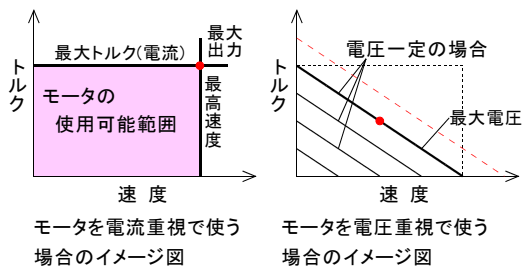
◇直流モータの電圧の式

- ・ $V=Ri \times Ks$ (i :電流(トルク), s :回転速度)
- ・ $V=一定$ のとき (モータに電圧源接続)
 $s=0$ (停止) $\Leftrightarrow i$ が最大(V/R) \rightarrow トルク最大
 $i=0$ (トルク0) $\Leftrightarrow s$ 最大
 $i=(V/R)-(K/R)s$ 右下がりの直線のグラフ

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

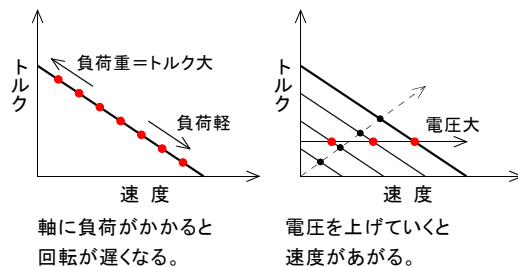
◇ 直流モータの特性グラフ



モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

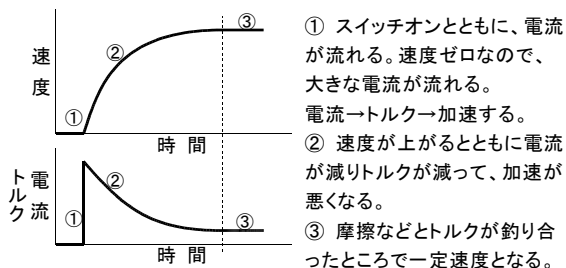
◇ 直流モータの電圧を調整して使う場合



モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータをスイッチオンしたとき



モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの制御

- ・モータの性能を引き出すためには、最大速度を超えない範囲でトルク(電流)を調整するようにする。
- ・メカの制御をする場合も、特性を安定させやすいのは、トルク制御。
※特にロボット類
※市販の制御装置でも一般的に内部で使われる

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

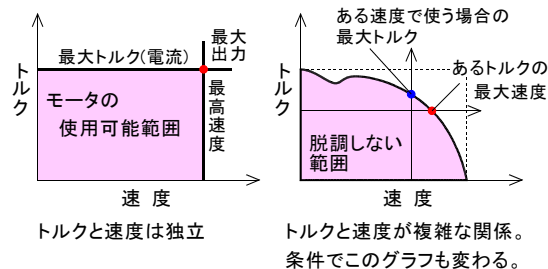
◇ 直流モータの制御

- ・動作が決まっている場合、負荷が一定の場合、細かな制御を要さない場合は、**電圧**の制御でも調整できる。
- ・速度が低いときの電圧のかけ過ぎに注意：
 - ・過負荷で回らないと**過電流**の恐れ。
 - ・より危険なのは急な逆回転。(原理的に倍の電流が流れる)

モータの特性と制御

○ ステッピングモータの特性

◇ 直流モータとの比較



モータの特性と制御

○ ステッピングモータの特性

◇ 直流モータとの比較

- ・使用可能範囲はメーカーのグラフを読み取る。(他のモータと違って[数値]では示されない ※速度ゼロのトルクは示される: 静止トルク)
- ・直流モータに負荷をかけると速度が落ちる。ステッピングモータは脱調しない限りは速度は落ちないが、限界を超えると脱調して停止、トルクもほとんど無くなる。

モータの特性と制御

○ 交流モータの特性

◇ 多くは周波数に依存する

- ・同期式は完全に周波数に比例して回転。
- ・誘導式は周波数に比例した速度から、負荷トルクに応じて若干速度が落ちる。(すべりと呼ばれる) 速度ゼロでは、大きくすべりつつも、トルクがあるため、加速はできる。

モータの特性と制御

○ 交流モータの制御

◇周波数を可変する制御

- ・周波数を調整することで速度調整。
- ・ただし、電圧が同じ場合は低速のときに大きな電流が流れる→電圧も下げる
=VVVF制御インバータ

◇トルクを可変する制御

- ・ベクトル制御インバータ
数式処理で直流モータと似た制御を行う。

まとめ

○ モータの基礎・種類

- ・一般的なモータは電力を入力することで回転動力(トルク&速度)を出力する。
- ・磁気と電流の相互作用を用いたものが主に用いられている。
- ・大まかには直流/交流/ステッピングに分類されるが、かなり多くの原理、種類があり、それぞれ特徴が異なる。

まとめ

○ モータの活用

- ・モータを使う場合、ある程度はモータの特性を知っておいたほうがよい。
- ・モータの選定では、モータに要求されるトルクと回転速度が重要な数値である。
- ・実際の選定では動力を用いると便利。
- ・専用の制御装置を用いずに、自分で制御を行う場合は、特性に応じた電流/電圧の制御が必要である。