

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

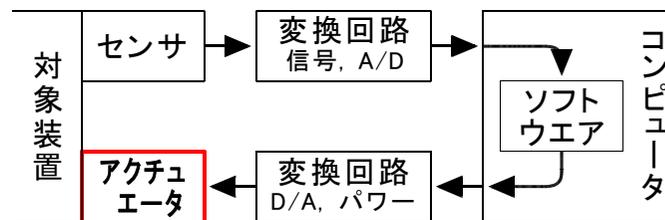
テーマ2:モータの活用

- ・モータの使い方
- ・モータの選定
- ・モータの特性と制御

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**。



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

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）

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

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。



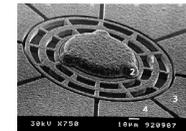
大島商船高専サイトより

モータの種類

○ 電力で動作するモータ

◇ 静電気力モータ

- ・静電気力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、プロジェクト



東京大学サイトより

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)



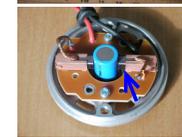
外観



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



←センサの線
モータの線→

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

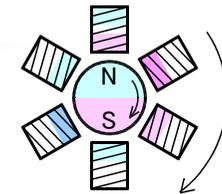
- ・**交流電力**で回転するモータ。
- ・**同期型**交流モータ
周波数に連動した回転速度
- ・**非同同期型**交流モータ
周波数に連動しない回転速度
※周波数の影響を強く受けるは多い
- ・一般に直流モータより簡単・コンパクト。

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式同期モータ。
- ・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。



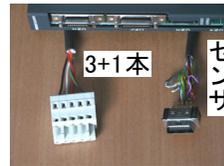
山洋製 モータ+センサ

C08 モータの基礎



サーボアンプ

Page. 17 基礎からのメカトロニクスセミナー



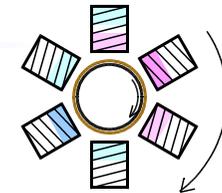
配線の例

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 誘導モータ(非同期型)

- ・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

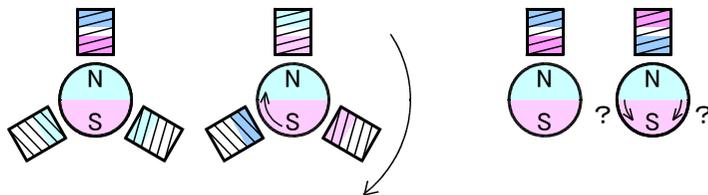
Page. 18 基礎からのメカトロニクスセミナー

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

- ・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

○ 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

◇ 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)

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。

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~、ステツパ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。

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。



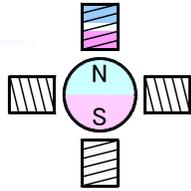
ステッピングモータ

配線: 一般に多い

内部の拡大図

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

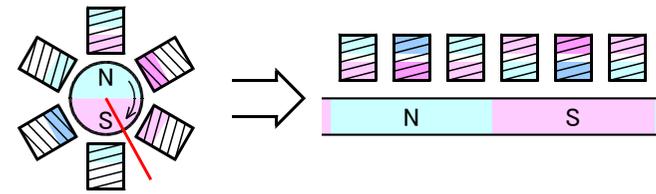
モータの種類

○ リニアモータ

◇ 直線的に動くモータ

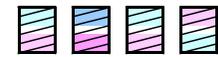
- ・回転式の(交流/ステッピング)モータを切り開いて、直線的に動くようにしたもの。

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

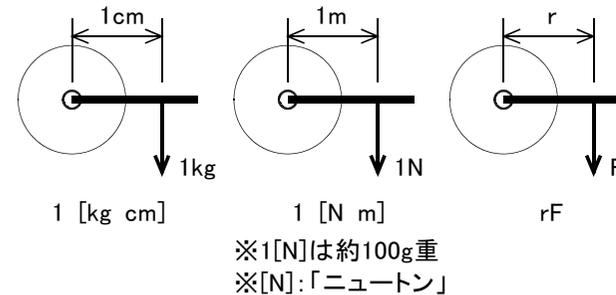
モータの使い方

○ 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)

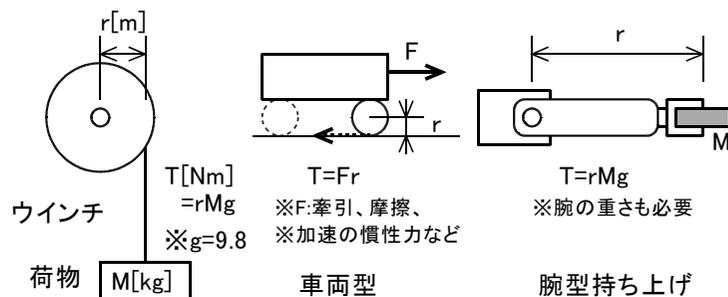


モータの使い方

○ 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]

$$\text{トルク[Nm]} \times \text{回転速度[rad/s]} = [W]$$

$$\text{力[N]} \times \text{速度[m/s]} = [W]$$

$$\text{電圧[V]} \times \text{電流[A]} = \text{電力[W]}$$

$$\text{※[rpm]} \rightarrow (\div 60 \times 6.28) \rightarrow \text{[rad/s]}$$

- ・ 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

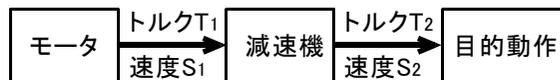
- ・ 多くのモータは
「回転は速いが、トルクが少ない」
- ・ 多くの用途は
「トルク・力は必要だが、速度はいらない」
- ・ 用途のトルクを満たそうとするとかなり大きなモータが必要になる。
→ **変速機**(ギアボックス)を用いる。

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、使い方で大きく変わる

- ・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

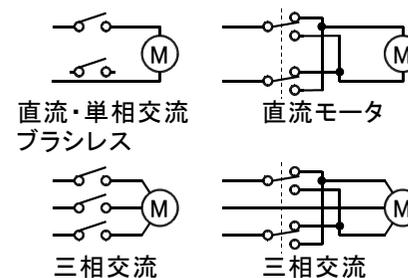
◇ただ回す場合

- ・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

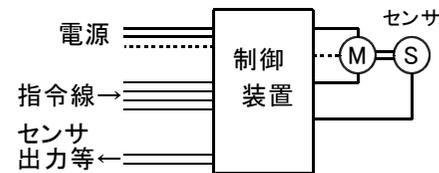
- ・専用の制御装置を併用するなら、モータの方式はあまり問わない。セットのコストや、制御装置の使い勝手のほうが重要。
- ・制御部を内製するなら、直流モータ、ステッピングモータが無難。
(どちらも簡単な回路でそこそこ回せる)



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

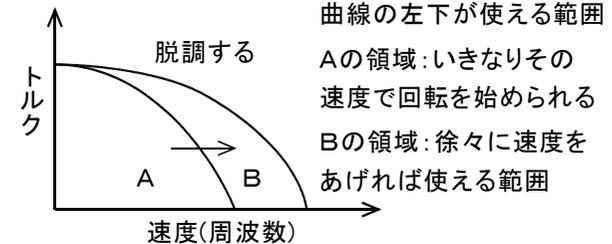
- ・大きすぎるモータはコスト増。
さらに重く大きくなるため、それが原因でより大きなモータが必要になることが多い。
(余裕は必要 : 動力見積の甘さ対策)
- ・モータ仕様の**定格**と**最大(絶対、瞬時)**:
定格: 連続して使って良い範囲
最大: 短時間なら出せる範囲(定格より大)

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は電流

$$\cdot [\text{モータのトルク}] = [\text{トルク定数}] \times [\text{電流}]$$

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

$$\cdot [\text{モータに加えた電圧}] = \\ [\text{モータの電気抵抗}] \times [\text{電流}] + \\ [\text{起電力定数}] \times [\text{回転速度}]$$

※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

$$\cdot V = Ri \times Ks \quad (i: \text{電流(トルク)}, s: \text{回転速度})$$

$$\cdot V = \text{一定のとき (モータに電圧源接続)}$$

$$s=0(\text{停止}) \Leftrightarrow i \text{が最大}(V/R) \rightarrow \text{トルク最大}$$

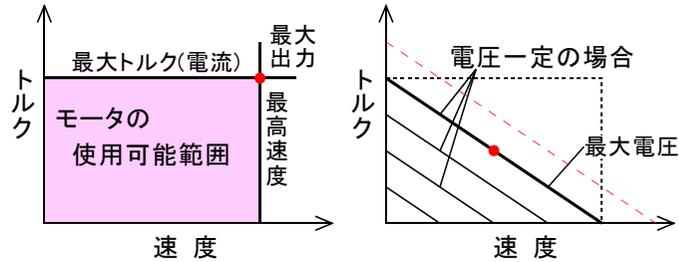
$$i=0(\text{トルク0}) \Leftrightarrow s \text{最大}$$

$$i = (V/R) - (K/R)s \quad \text{右下がりの直線のグラフ}$$

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



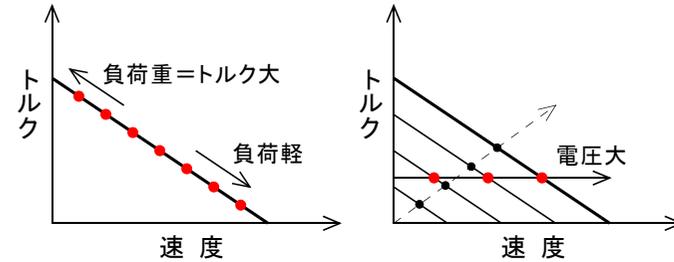
モータを電流重視で使う
場合のイメージ図

モータを電圧重視で使う
場合のイメージ図

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



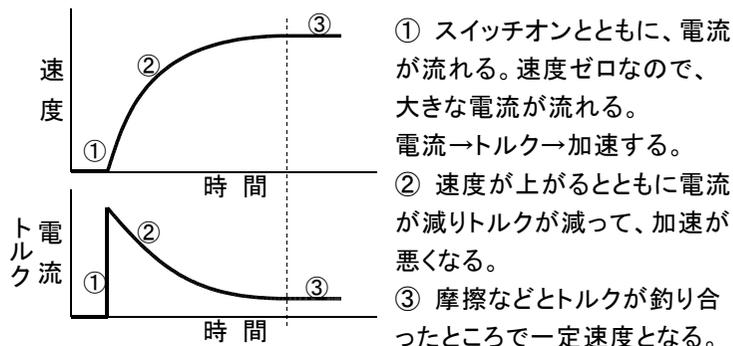
軸に負荷がかかると
回転が遅くなる。

電圧を上げていくと
速度があがる。

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



① スwitchオンとともに、電流が流れる。速度ゼロなので、大きな電流が流れる。電流→トルク→加速する。

② 速度が上がるとともに電流が減りトルクが減って、加速が悪くなる。

③ 摩擦などとトルクが釣り合ったところで一定速度となる。

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

- ・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

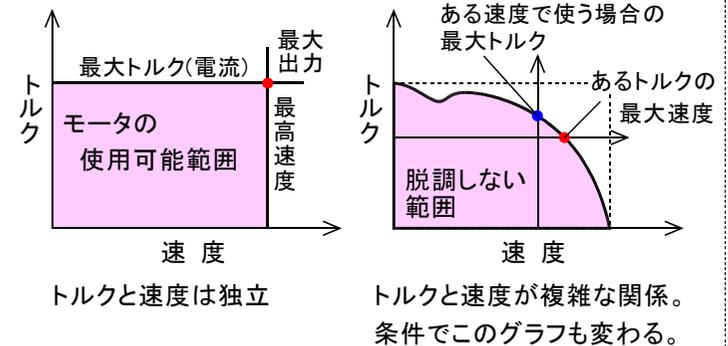
◇直流モータの制御

- ・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。