

# 制御理論特論

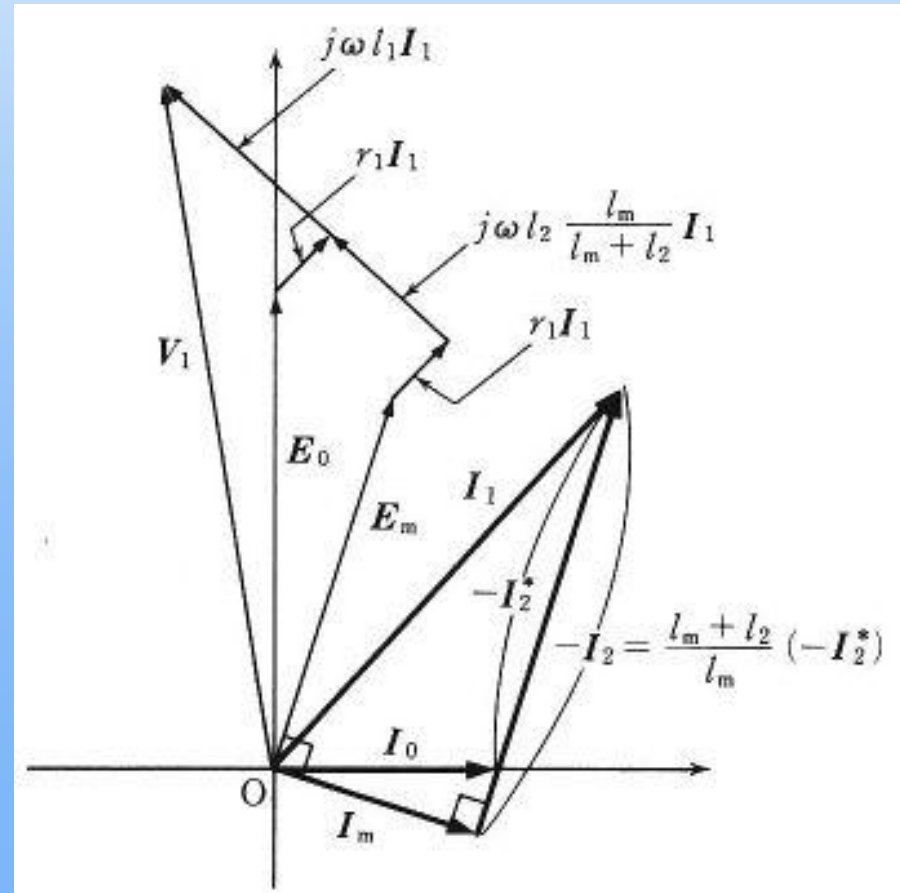
明治大学 理工学研究科  
機械工学専攻

# 補足説明

- 誘導モータの制御
  - 同期モータより制御性が悪いと説明したが、ベクトル制御により同期モータ同様に制御できる。

# 誘導モータでもサーボは掛かる

- ステータに巻線，ロータも巻線（ただし閉じている）
- ステータ，ロータおよび合成された磁束の電圧，電流をベクトルで表現し，合成されたもののが決められた大きさとなるように制御（電圧，電流は直交し，各相は $120^\circ$ の位相差）



これを実現するため，3相誘導モータ用にベクトル制御が考案された

# 誘導モータの特徴

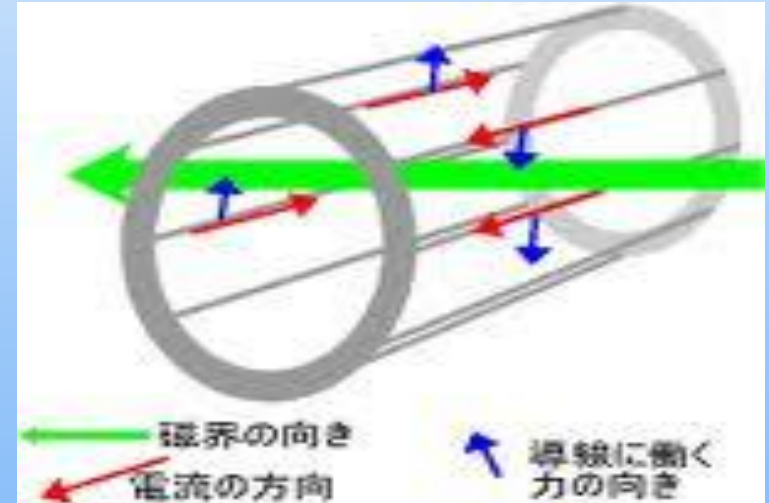
|              | 誘導モータ                                                    | 同期モータ                            |
|--------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|
| ステータの構造と磁界生成 | 3相の巻線により回転磁界を発生                                          | ←                                |
| ロータの構造       | 閉じられた巻線、またはかご型                                           | 永久磁石                             |
| ロータの動作       | 回転磁界に対して遅れ（すべり）が発生                                       | 回転磁界に同期して回転                      |
| トルクの発生       | すべりの大きさ（回転磁界周波数に対するロータ回転数の差）に応じたトルク                      | 磁界の強さ（電流の大きさ）に応じたトルク             |
| 制御法          | V/f制御<br>センサ付きトルクベクトル制御<br>センサレストルクベクトル制御<br>VVVFインバータ制御 | センサ付きトルクベクトル制御<br>センサレストルクベクトル制御 |

# 誘導モータの動作原理

- ロータには巻線またはカゴを用いる。（両者とも原理は同じ）
- 磁界を受けて誘導電流が発生し，磁界に直交するように反発力を発生

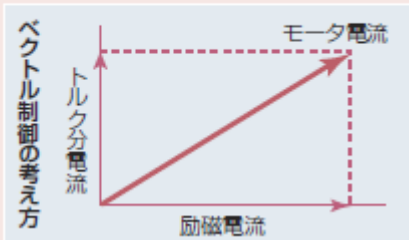
回転磁界の回転数に対してロータの回転数が近付くにつれ，誘導電力は小さくなる

→ 回転磁界の回転数とロータ回転数の違い（速度差：すべり）に応じて誘導電力は大きくなりトルクは増大

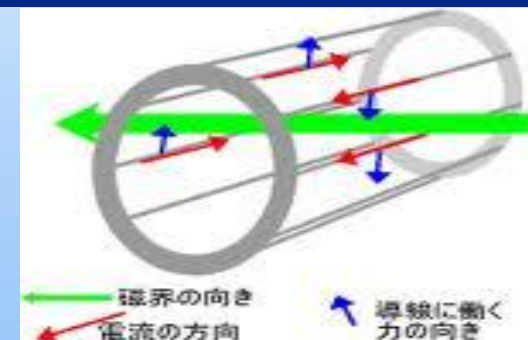


# ベクトル制御

ベクトル制御は、モータに流れる電流のうち、トルクになる電流（トルク分電流）と回転子に磁界を発生させるための電流（励磁電流）を分けて考え、モータ電流の方向をベクトル演算し制御する方法です。



ベクトル制御はモータの特性に見合った電流を流せるので、高い汎用性を実現しています。また、低速トルク、速度制御範囲、速度制御精度などの制御性能においてV/f制御より優れています。しかし、モータの特性をインバータに教える必要がありますので、モータパラメータの設定を行わなければなりません。



|        | V/f制御                                     | ベクトル制御 (PGレス)                                  |
|--------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 低速トルク  | <p>【V/f制御】</p> <p>低速でモータを駆動してもトルクが出ない</p> | <p>【ベクトル制御】</p> <p>低速0.3Hz域からでも一定のトルクが出力可能</p> |
| 速度制御範囲 | 1:40                                      | 1:200                                          |
| 速度制御精度 | ±2~3%                                     | ±0.2%                                          |

## 適用用途

### ◆ V/f制御:

始動トルクが小さく  
負荷変動も少ない用途。



(てい減トルク特性を適用するファン、ポンプや慣性力の大きい遠心分離機など)

### ◆ ベクトル制御:

始動トルクが大きく  
負荷変動のある用途。



本当のゼロ近傍には適していないことは留意

## 2. ベクトル制御モデリング

### 2.1 ベクトル制御基本原理

本節は、モデリング解説のために、ベクトル制御の基本原則について触れておく。

図2.1のように三相交流モータの電機子電流 $I$ は、位相が $120^\circ$  ずつずれたUVWの座標軸上で観測すると、電源角周波数 $\omega$ で回転するベクトルとして観測できる。扱いやすいように $90^\circ$  ずつずれた二相の $\alpha\beta$ 座標系に変換し、さらに、電源角周波数と同じ角速度の回転座標系で、電流ベクトルを観測すれば、電流ベクトルを静止させて観測できる。つまり、直流量とみなすことができる。静止座標系 $\alpha$ 軸と、回転座標系 $d$ 軸のなす角 $\theta$ は任意に選択できるが、誘導モータの場合、ロータ(回転子)の鎖交磁束ベクトルを $d$ 軸ととるのが扱いやすい。交流モータのトルク(図2.2の影付きの面積)は次式のように、磁束と電流の外積で表せる。

$$T_e = P_m (\lambda_r \times I_r) \quad (2.1)$$

ただし、 $P_m$ : 極対数,  $\lambda_r$ : ロータ磁束ベクトル,  $I_r$ : ロータ電流ベクトル

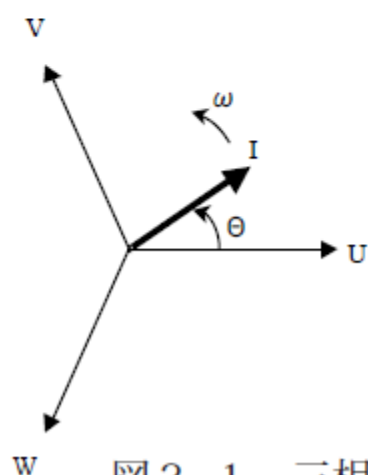


図2.1 三相静止座標系

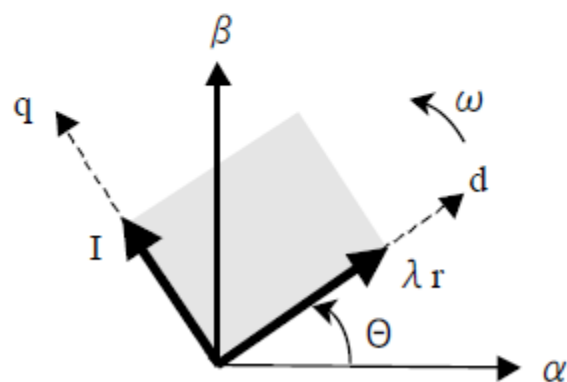


図2.2 二相静止座標系と回転座標系



d軸をロータ磁束ベクトルにとることで、(2.1)式は、

$$T_e = P_m \lambda_{dr} \frac{M}{L_r} i_{qs}$$

ただし、 $M$ : 相互インダクタンス  $L_r$ : ロータ自己インダクタンス (2.2)

のように表される。添え字の s はステータ(固定子)、r はロータを意味する。また、ロータ磁束は、

$$\lambda_{dr} = \frac{M}{1 + \tau_r s} i_{ds}$$

ただし、 $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ : 二次磁束時定数 (2.3)

で表される。(2.2)式、(2.3)式からロータ磁束を一定にすると、q軸電流でトルクが制御できることが分かる。磁束ベクトルの位相による座標変換で、DCモータと同様に直流量の目標値を使って制御が可能になる。



ベクトル制御をかけることにより、指令値を与えれば電流がコントロールできるためトルク制御が可能。あたかもDCモータのように振る舞うので制御性が良くなったといえる。

DCモータは電流値がそのままトルクとなるため、トルク制御がしやすいが、ブラシとコギングトルクのため、必ずしも低速時の特性が良くない。



## 2.2 ベクトル制御モデル

磁束ベクトルの正確な把握は、誘導モータのベクトル制御では要である。磁束ベクトルの検出には、ホール素子による磁気センサ等により、直接検出する方法や、角度センサから検出した回転角速度にすべり角周波数を加えて間接的に求める方法等がある。ここでは、磁束オブザーバを用いて、磁束ベクトルと回転速度を推定するモデルを考える。磁気センサ,位置センサを必要としないセンサレスの方式の一つである。

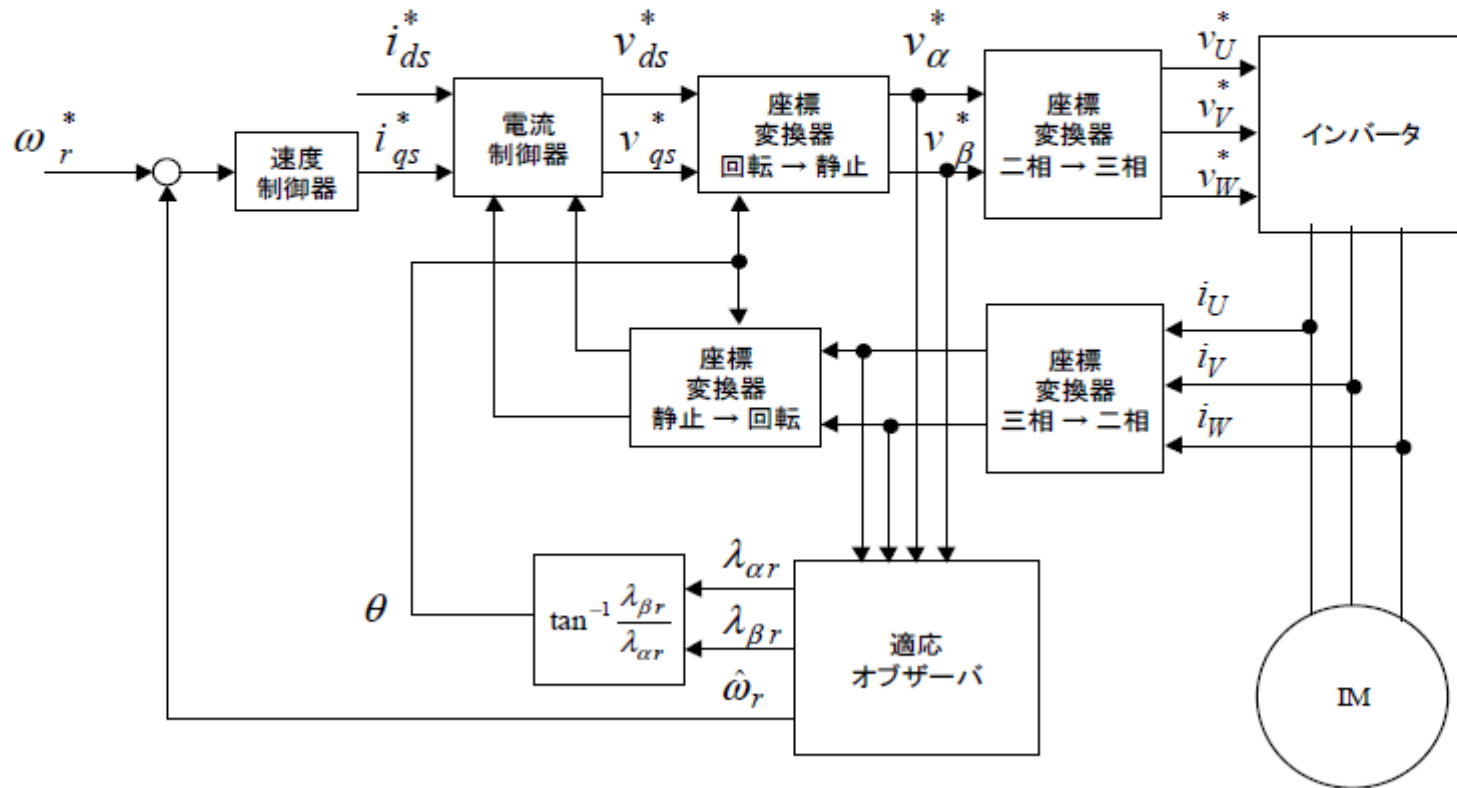


図2.3 位置センサレスベクトル制御構成図

図の記号の\*は目標値、 $\hat{\cdot}$ は推定値を示している(本稿末参照)。電流制御器は、回転座標系で考えたP I制御ループである。適応オブザーバは、二相の静止座標系で構築している。座標変換は、以下のような式で表され、例えばSimulinkのFcnブロックの数式定義で容易に表現できる。

$$\text{回転行列: } C = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \text{三相二相変換行列: } D = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix}$$

$$\text{回転座標系への変換 } \underline{i}^e = C \underline{i}, \quad \text{静止座標系への変換 } \underline{v} = C^T \underline{v}^e$$

$$\text{三相二相変換 } \underline{i}_2 = D \underline{i}_3, \quad \text{二相三相変換 } \underline{v}_3 = D^T \underline{v}_2$$

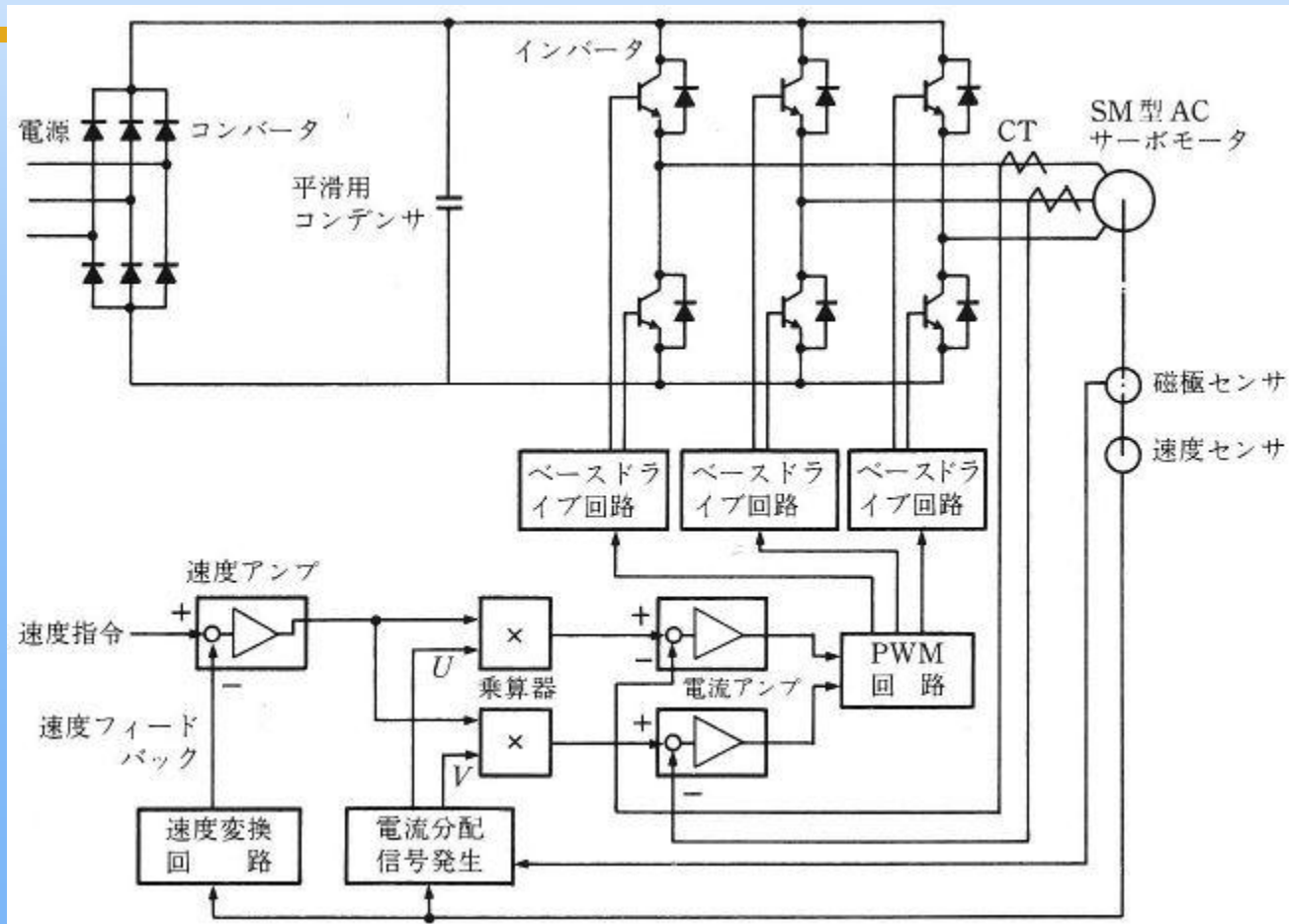
ただし、 $\underline{\cdot}$ はベクトル、 $e$ は直流量、 $T$ は転置、添え字2は二相、3は三相を表す。

### 3相2相変換

回転磁界3相の各相の電圧、電流、磁束ベクトルに対し、回転子の2相(磁束、電流ベクトル)に投影しなおす座標変換のこと。

3相はUVW相と表記され、  
回転子はq-d座標と表記される

# 同期モータのベクトル制御



良く似たブロック線図であるが、よりシンプルでも運用可能であることに注目

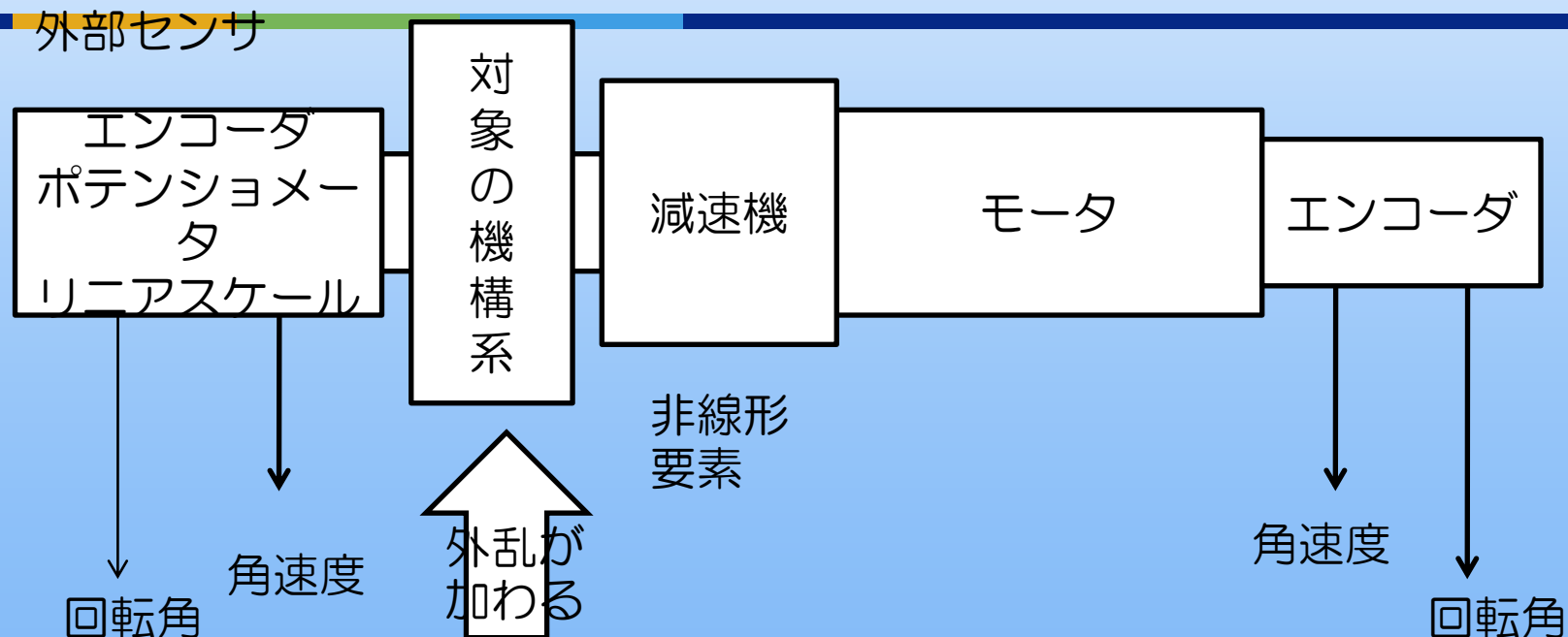
# サーボドライバの実際

サーボドライバ  
の取扱説明書の  
例

## 5. 調 整

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 1. ゲイン調整              |      |
| 概 要 .....             | 5-2  |
| 2. リアルタイムオートゲインチューニング |      |
| 基本機能 .....            | 5-4  |
| 3. 適応フィルタ .....       | 5-10 |
| 4. マニュアルゲインチューニング（基本） |      |
| 概 要 .....             | 5-13 |
| 位置制御モードの調整 .....      | 5-14 |
| 速度制御モードの調整 .....      | 5-17 |
| トルク制御モードの調整 .....     | 5-17 |
| フルクローズ制御モードの調整 .....  | 5-18 |
| ゲイン切替機能 .....         | 5-19 |
| 機械共振の抑制 .....         | 5-22 |
| 5. マニュアルゲインチューニング（応用） |      |
| 制振制御 .....            | 5-26 |
| フィードフォワード機能 .....     | 5-28 |
| 瞬時速度オブザーバ .....       | 5-30 |
| 外乱オブザーバ .....         | 5-32 |
| 第 3 ゲイン切替機能 .....     | 5-34 |
| 摩擦トルク補償 .....         | 5-36 |
| ハイブリッド振動抑制機能 .....    | 5-38 |
| 2 段トルクフィルタ機能 .....    | 5-39 |

# 制御法のいろいろ



|   | 位置制御          | 速度制御  |
|---|---------------|-------|
| ① | 外部センサ         | エンコーダ |
| ② | エンコーダ         | エンコーダ |
| ③ | 外部センサ         | 外部センサ |
| ④ | 外部センサ・エンコーダ併用 | エンコーダ |

# それぞれの制御法の特徴

## ③ 外部センサ制御

- 全て外部のセンサで計測
- 対象そのものを制御する正確さが特徴
  - 機械要素, センサ要素, モータの特性を含んで制御可能
- 各要素を制御系に含む
  - 機械要素, センサ要素, モータとも高精度が要求
  - バックラッシ等の非線形要素があると発振

## ② 通常の制御（セミクローズ制御）

- モータのセンサで計測
- モータ中心の制御で簡便さが特徴
  - エンコーダの分解能が多少悪くても減速比で吸収可能
- 応答性に優れる
- 各要素が制御系に反映しきれない
  - 機械要素の制度の悪さが制御結果に大きく影響
  - モータが発振しなくても機構はガタつく
  - 摩擦などの成分は反映不可



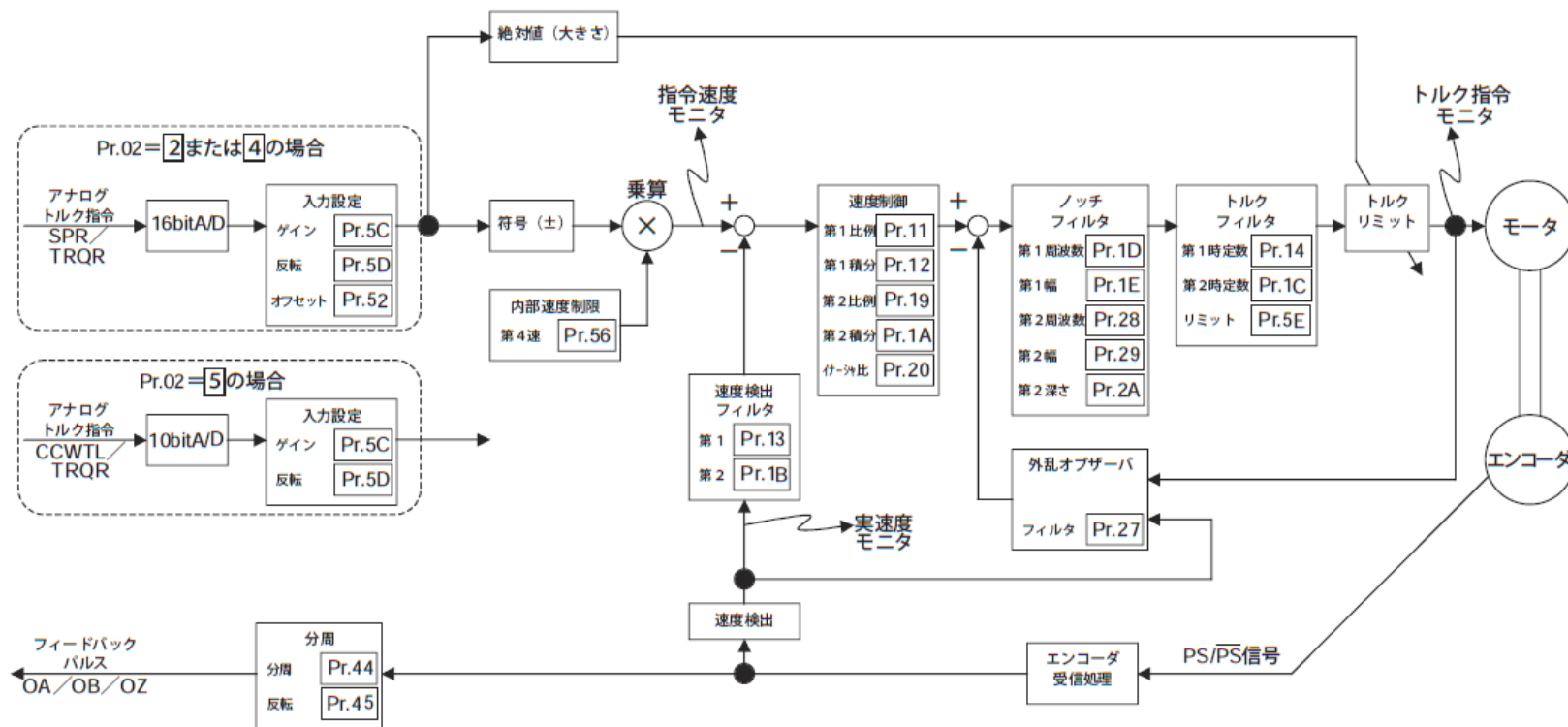
# それぞれの制御法の特徴

## ① フルクローズ制御

- 位置を外部センサ，速度をモータのエンコーダで計測
- 対象そのものを制御し，モータの応答性を制御できることが特徴
- 各要素を制御系に含む
  - 各要素の精度要求が緩和できる
  - 多少の非線形要素があっても調整により発振を抑えられる
- 機械要素の剛性の低さが悪影響を及ぼす
  - ばねのように作用しゲインが挙げられない

## ④ ハイブリッド制御

- 位置を外部センサとエンコーダで併用，速度をモータのエンコーダで計測
- これらの問題を解消する制御法
- 対象の制御状態とモータの制御状態を比較して制御
  - フルクローズ制御の精度とセミクローズの即応性を実現



## ノッチフィルター

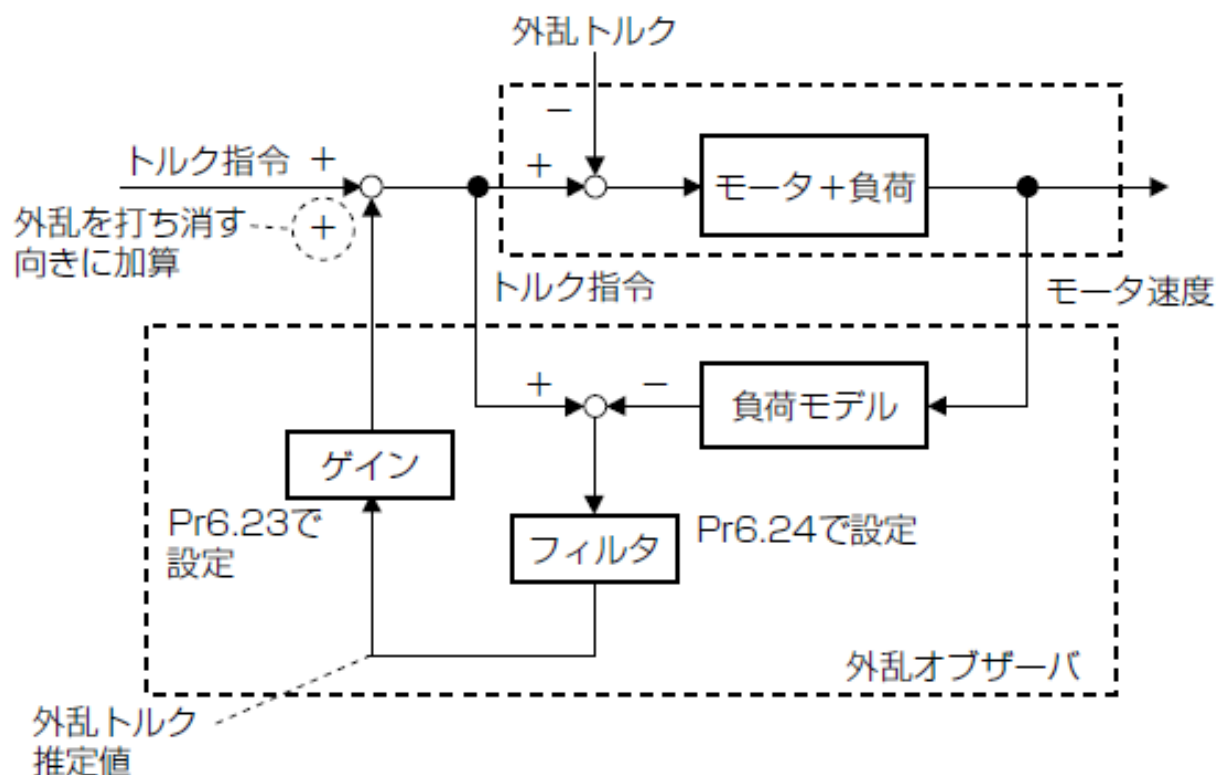
負荷になる機械系の固有振動数付近の共振を避けるため、近傍のゲインを落とす。

Q値（尖鋭度）の大きなフィルタを使う必要がある。

# 外乱オブザーバ

## 概 要

外乱オブザーバを用いて推定した外乱トルク推定値を用いることで、外乱トルクによる影響を減らし、振動を低減する機能です。



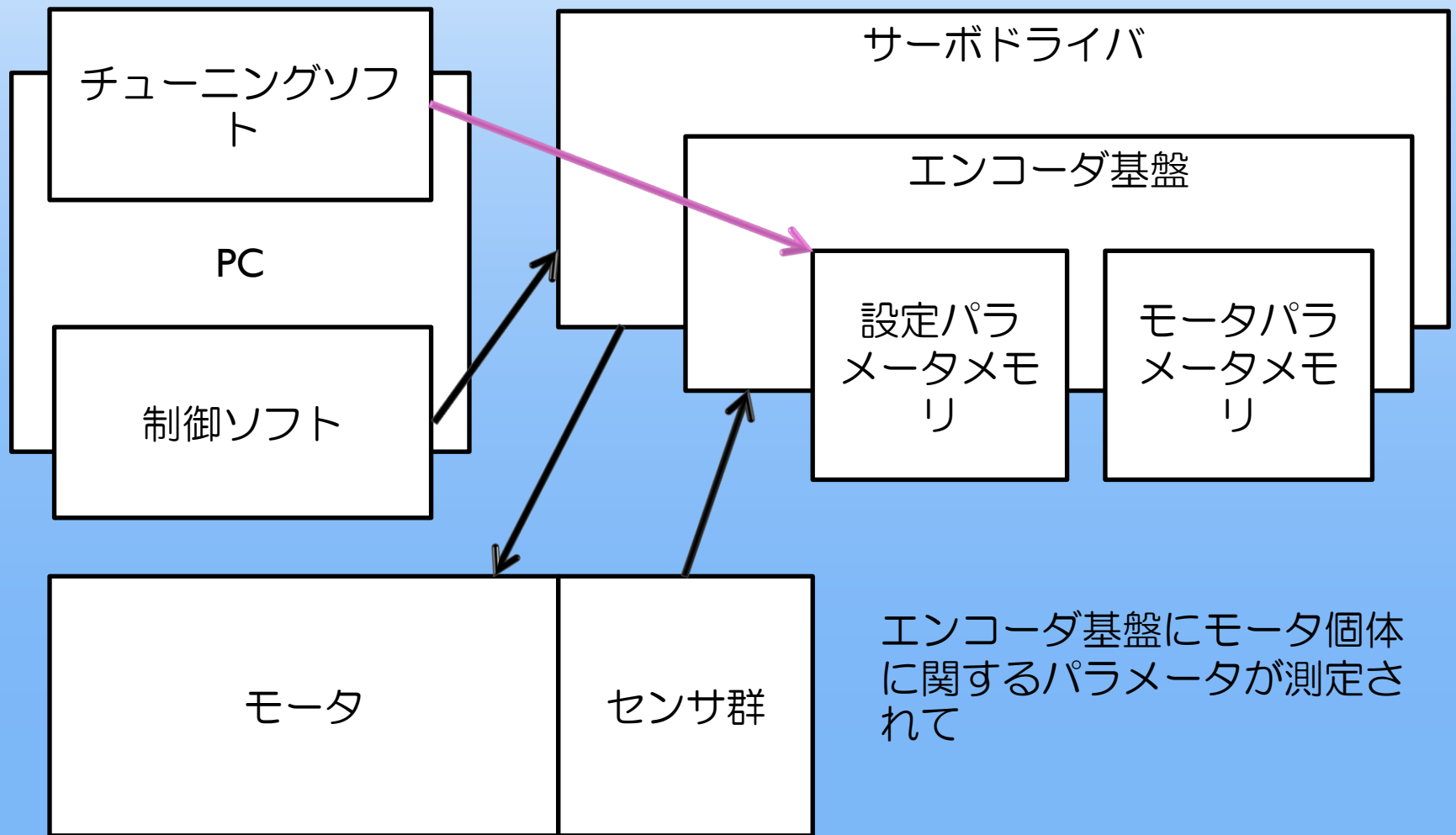
# ACサーボモータの問題

- モータ単体の特性を把握していないと制御結果が出鱈目になる。（振動，鳴き，効率低下，トルク不足）
- 負荷特性を把握していないと外乱に対するロバスト性が大きく崩れる



これらを解決したものが  
サーボメーカーの高付加価値の製品

# 実際の製品の例



# 今日の課題

---

ありません。  
ご安心を