MATLAB EXPO E4 16:30-17:10





近畿大学理工学部機械工学科 小坂 学 kosaka@mech.kindai.ac.jp http://www.mec.kindai.ac.jp/mech/lab/kosaka



●研究室・・・制御工学研究室

●研究テーマ

- ・IPMモータのセンサレス機器定数同定
- ・安定余裕を指定する限界性能カスケード制御
- VCMによる制振制御
- 二重倒立二輪の部分的厳密な線形化

MATLAB®とArduino®で 制御実験できる!

 \downarrow

Simulink® support package for Arduino



2



【モータのセンサレスドライブ】・・・回転角センサを使 わなくても回転角や回転速度を制御できるようにします。

【制御理論の実用化】・・・制御理論が実際の制御で役立つようにします。

【ロボット】・・・人の役に立ち、人の技を超えるロボットを研究します。

【筋電位インターフェース】・・・キーボードも指も使わないでパソコンやスマートフォンやゲームを操作できるようにします。

【機能的電気刺激】・・・麻痺患者が再び歩けるようにすることを目指します。

【空気圧式二足ロボット】・・・人にぶつかっても安全なロボットを目指します。

https://sites.google.com/site/kosaka3lab/

IPMモータの制御理論からMATLABによる 解析方法を紹介した書籍





http://www.catnet.ne.jp/triceps/pub/ws243.htm

4



- ブラシレスDCモータ(SPMSM, IPMSM, SynRM)
 のモデル化を説明する。
- MATLAB2018aの「Simscape™ Power Systems™※」に Simulink用のブロックがある。

※2018bより「Simscape Electrical™」



Permanent Magnet Synchronous Motor

■ブラシ付き直流モータ

- ・ 欠点:ブラシの磨耗による粉塵、寿命劣化
 - → 永久磁石同期モータ (PMSM; Permanent Magnet Synchronous Motor) はブラシをなくすことができる



 $\begin{cases} v = Ri + L\dot{i} + K_E \omega & \leftarrow \ensuremath{\mathbb{R}} E \ensuremath{\mathsf{E}} + L\dot{i} + K_E \omega & \leftarrow \ensuremath{\mathsf{N}} + L \ensuremath{\mathsf{D}} + L \ensuremath{\mathsf{D}} + L \ensuremath{\mathsf{C}} + L \ensuremath{\mathsf{D}} + L \ensuremath{\mathsf{C}} + L \ensuremath{\mathsf{D}} +$



■永久磁石同期モータ(PMSM)

- ・長所:ブラシなし。誘導モータよりも高効率。
- ・欠点:ロータの位置に応じた印加電圧の制御が必要
 - → 位置センサまたはセンサレス技術が必要



直流モータはステータが永久磁石、 電磁石 逆起電圧 ロータが電磁石だったが、PMSMは逆。 $\phi \omega$ 直流モータは一定電圧を印加すれば 電圧v 抵抗 R インダクタンス L。 トルクが一定となったが、PMSMは 電流i。 ロータの位置に同期した交流電圧を 座標変換を行えば、等価回路は、 印加し、回転磁界を発生するとトルク が一定となる。 直流モータと同じで、 トルクも電流に比例する。 → 位置情報が必要!

■ブラシレスDCモータの構造

PMSMの構造



日本電気技術者協会より引用 https://www.jeea.or.jp/course/contents/07111/





3相固定UVW座標モータモデル(電圧方程式)

$$\begin{aligned} v_{3} = R_{a}i_{3} + \frac{d}{dt}(L_{3}i_{3}) + e_{3} \\ \uparrow = \uparrow \stackrel{\leftarrow}{=} \downarrow \begin{bmatrix} v_{u} \\ v_{v} \\ v_{w} \end{bmatrix}, i_{3} = \begin{bmatrix} i_{u} \\ i_{v} \\ i_{w} \end{bmatrix} \\ e_{3} = \frac{d}{dt} \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}}\phi_{a} \begin{bmatrix} \cos\left(\theta\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\ R_{a} : 巻線抵抗 \\ \phi_{a} = \sqrt{3/2}\phi, \phi : 鎖交磁 束 \\ M_{uv} = L_{a} + L_{a} - L_{as}\cos(2\theta) \\ L_{v} = l_{a} + L_{a} - L_{as}\cos\left(2\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \dots L_{u} \\ \mathcal{O} = \phi + \frac{2}{3}\pi \\ L_{w} = l_{a} + L_{a} - L_{as}\cos\left(2\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \dots L_{u} \\ \mathcal{O} = \phi + \frac{2}{3}\pi \\ M_{vw} = -\frac{L_{a}}{2} - L_{as}\cos\left(2\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \end{pmatrix} \end{aligned}$$



- 3相の入力電圧を緻密に制御することで
 トルク最大化などを達成するベクトル制御 (αβ変換, dq変換とモデル, 制御系)
 を説明する。
- MATLABの「Simscape Power Systems[※]」に Simulink用のブロックがある。 ※2018bょり 「Simscape Electrical」





- ●モータの座標変換は 電力が保存されるように 電流と電圧に回転変換行列 (直交行列C^TC=I) をかける
- ●各種座標変換 3相固定UVW座標: 実モータの電流と電圧 2相固定 α β 座標 α 軸はU軸と同じ。 β 軸は α 軸と直交。 • 2 相回転dq座標 ロータ上の座標。 d軸は永久磁石の磁束方向。 q軸はd軸と直交。

● 3 相固定UVW座標から 2 相固定 α β 座標への座標変換(αβ変換) 条件:α軸はU軸と同じ。 β軸はα軸と直交。



電圧ベクトルと電流ベクトルを定義。

$$v_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \end{bmatrix}^{T}$$

 $v_{\alpha\beta o} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} & v_{o} \end{bmatrix}^{T}$
 $i_{\alpha\beta o} = \begin{bmatrix} i_{\alpha} & i_{\beta} & i_{o} \end{bmatrix}^{T}$
 $i_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} i_{\alpha} & i_{\beta} \end{bmatrix}^{T}$
座標変換により、電圧と電流を得る。

$$v_{\alpha\beta o} = C_3 v_3$$
$$i_{\alpha\beta o} = C_3 i_3$$





●2相固定αβ座標から2相回転da座標への座標変換(da変換) 条件:ロータ上の座標。

> d軸は永久磁石の磁束方向。 q軸はd軸と直交。



• 2相固定 $\alpha \beta$ 座標モータモデル

3相固定UVW座標モータモデルは次式だった。

$$v_3 = R_a i_3 + \frac{d}{dt} (L_3 i_3) + e_3$$

電流と電圧は次式の関係があった。
 $v_{\alpha\beta o} = C_3 v_3$ $\therefore v_3 = C_3^T v_{\alpha\beta o}, \because) C_3^T C_3 = I$
 $i_{\alpha\beta o} = C_3 i_3$ $\therefore i_3 = C_3^T i_{\alpha\beta o}$
 $v_{\alpha\beta} - R_a i_{\alpha\beta} - L_q i_{\alpha\beta}$
 $= \frac{d}{dt} \left\{ (\phi_a + (L_d - L_q) i_d) \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \right\}$

●2相回転dq座標モータモデル

電流と電圧は次式の関係があった。 $v_{dq} = C_{dq} v_{\alpha\beta}$ $\therefore v_{\alpha\beta} = C_{dq}^{T} v_{dq}, \because) C_{dq}^{T} C_{dq} = I$ $i_{dq} = C_{dq} i_{\alpha\beta}$ $\therefore i_{\alpha\beta} = C_{dq}^{T} i_{dq}$ 2相固定 $\alpha \beta 座標モータモデルに上式を代入し、$ 左から C_{dq} をかけて整理すると

次の2相回転d q 座標モータモデルを得る。

$$v_{dq} = \begin{bmatrix} R_a + p L_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + p L_q \end{bmatrix} i_{dq} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix}$$

ただし p=d/dt は微分演算子。



| ■各種モータの構造と特徴 | | |
|--|--------|---|
| 表面磁石モータ (SPMSM) 回転子の位置に対し、 磁気抵抗が不変。 (非突極性)Ld=Lq | | $v_{dq} = \begin{bmatrix} R_a + pL & -\omega L \\ \omega L & R_a + pL \end{bmatrix} i_{dq} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix}$ $T = p_n \phi_a i_q $ 電磁石で永久磁石を引張る 低振動・低騒音 |
| 埋込磁石モータ (IPMSM) 回転子の位置に対し、 磁気抵抗が変化。 (突極性) Ld <lq< td=""><td></td><td>$\begin{aligned} v_{dq} &= \begin{bmatrix} R_a + p L_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + p L_q \end{bmatrix} i_{dq} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix} \\ T &= p_n \left(\phi_a + (L_d - L_q) i_d \right) i_q \\ \\ \hline \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{c} \mathbf{x} \mathbf{A} \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{b} \mathbf{b} \mathbf{c} \mathbf{g} \mathbf{a} \mathbf{c} \mathbf{b} \mathbf{c} \mathbf{g} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} c$</td></lq<> | | $\begin{aligned} v_{dq} &= \begin{bmatrix} R_a + p L_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + p L_q \end{bmatrix} i_{dq} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix} \\ T &= p_n \left(\phi_a + (L_d - L_q) i_d \right) i_q \\ \\ \hline \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{c} \mathbf{x} \mathbf{A} \mathbf{a} \mathbf{a} \mathbf{b} \mathbf{b} \mathbf{c} \mathbf{g} \mathbf{a} \mathbf{c} \mathbf{b} \mathbf{c} \mathbf{g} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} \mathbf{c} c$ |
| シンクロナスリラクタンスモータ (SynRM) 永久磁石をもたない。 (φa=0) 回転子の位置に対し、 磁気抵抗が変化。 (突極性) Ld<lq< li=""> </lq<> | q-axis | $v_{dq} = \begin{bmatrix} R_a + p L_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + p L_q \end{bmatrix} i_{dq}$ $T = p_n (L_d - L_q) i_d i_q$ 電磁石で鉄を引張る 高速・安価・軽い |



速度制御(機械角速度の制御)位置センサあり - Simulinkモデル

- test_motor_ml_sl.m
 - MATLABプログラムとSimulinkモデルの 解析を順番に実行するプログラム
- init_motor_control.m
 - モータ、制御器のパラメータの設定
- Results_IPM_vel_control.mat
 - 左記のMATLAB (main1_MW.m)の 解析結果
- IPM_vel_control.slx
 - 3相同期モータのセンサあり運転のモデル

•MATLABプロダクトの使用製品 (バージョン: R2018a)

- 基本環境: MATLAB、Simulink
- 物理モデリング: Simscape、Simscape Power System[™]
- R2018bで、Simscape Power System™とSimscape Electronics™が 統合されて、Simscape Electrical™になりました。

システム全体 (Simulink)



プラント (Simscape)



[thm]

thm [rad]

[thm]

thm [rad]

コントローラ (Simulink + Simscape)



Simulinkモデルの解析結果



ScopeのグラフをPPTなどで利用する





■ベクトル制御法

●PMSMの入力はidとiqの2つある。→2つの物理量を制御できる。 (1つはモータトルク)

- ●もう一つの制御量を何にするか?
 - ・電流の大きさ → 最大トルク制御
 I_aが一定のとき、Tを最大化するi_dを使う。
 過電流保護にかかる限界で最大トルク発生。

・電圧の大きさ → 弱め磁束制御(最高速度制御)
 V_aが一定のとき、Tを最大化するi_dを使う。
 インバータ入力電圧の限界で最大トルク発生。

●最大トルク制御

Í

メリット: モータ減磁保護のための過電流保護にかかる限界電流で 最大のモータトルクを発生できる。

d, βの式:

$$i_d = \arg_{i_d} \left(\frac{\partial T(I_a, i_d)}{\partial i_d} = 0 \right) = \frac{\phi_a - \sqrt{\phi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d)}$$

 $\beta = \sin^{-1}(-i_d / I_a) = \sin^{-1} \left(\frac{-\phi_a + \sqrt{\phi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \right)$



実用上は、 $\beta = 3.5^{\circ}$ 等に固定する電流位相一定制御や 実験により I_a が最も小さくなる β を求め、そのテーブルで制御を行う。

MATLAB適用事例3 弱め磁束制御

高速時、誘起電圧ωφ_aが大きくなるのでV_aを大きくしな ければならない。しかしV_aはインバータの出力限界まで。 インバータの出力限界電圧で最大のモータトルクを発生 できる。→ 高速運転が可能となる。

実用的なアルゴリズム:

Vaが限界に達すると速度が目標速度に達するまで、 β を大きく(i_d を小さく)する。(速度制御よりゆっくり)

●過変調PWM制御

矢部正明,坂廼辺和憲(三菱電機)、過変調PWMを併用したIPMモータのセンサレス駆動、
 電気学会回転機研究会資料 Vol. RM-01, No. 159-164. 166-169, Page7-12 (2001. 11. 15)
 〇変調率1を超える電圧を出力する方法。

→ 正弦波でなく矩形波を出力する。矩形波に含まれる基本波成分の振幅は、約1.3倍大きい。



-1.5 L



<u>埋め込み磁石同期モータの特長</u>

(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)



<u>PMSMのセンサレスドライブ法</u>

角度センサは高価で壊れやすい そこで 角度センサなしで角度を推定できる センサレスドライブ

- ・120°通電を行い誘起電圧のゼロクロスを検出
- ・拡張誘起電圧を利用
- ・拡張カルマンフィルタ(EKF)を利用

●120度通電を行って60度の無通電区間に誘起電圧を検出する方法 120度通電を行うと、UVW相が順に60度ごとに無通電となる。 このとき、無通電の相電圧は誘起電圧となり、そのゼロクロスを 検出すれば60度ごとの角度が得られる。

→ 問題点:・分解能が60度と粗い。

低速時は誘起電圧が小さいので位置推定できない。

37

- 電流位相を制御するとゼロクロスが無通電区間内 から外れる恐れがある。
- ・L₃が大きいと、RLの電圧降下がノイズとなる。

$$v_{3} = \left[R_{a}i_{3} + \frac{d}{dt} \left(L_{3}i_{3} \right) + e_{3} \right]$$

$$e_{3} = \frac{d}{dt} \left\{ \sqrt{\frac{2}{3}}\phi_{a} \left[\begin{array}{c} \cos\left(\theta\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right] \right\}$$

■拡張誘起電圧に基づく方法

参:森本、河本、武田,推定位置誤差情報を利用したIPMSMの位置・速度センサレス制御, 電学論D、122巻7号,平成14年(2002)

- \bullet 2相 $\gamma \delta$ 回転座標モータモデルに電圧と電流を入力し、
 γ 軸誘起電圧がゼロとなるように、位置と速度を推定する。
 \bullet 仮定: $\hat{o} = o$
- ●より正確な推定を行えるようにγδ座標モデルを変形。

$$v_{\gamma\delta} = \begin{bmatrix} R_a + p L_d & -\omega L_q \\ \omega L_q & R_a + p L_d \end{bmatrix} i_{\gamma\delta} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{\gamma} \\ \varepsilon_{\delta} \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\gamma} \\ \varepsilon_{\delta} \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_e) \\ \cos(\theta_e) \end{bmatrix} + (\hat{\omega} - \omega) L_d \begin{bmatrix} -i_{\delta} \\ i_{\gamma} \end{bmatrix}$$
$$E_{ex} = \omega \left\{ \phi_a + (L_d - L_q) i_d \right\} - (L_d - L_q) i_d$$

●次式の位置誤差の推定値は $\hat{o} = o$ ならばゼロとなる。

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{-\varepsilon_{\gamma}}{\varepsilon_{\delta}}$$

●次の位置推定ブロック線図により位置推定を行う。



■拡張カルマンフィルタによる方法

●SPMSN用 S. Bolognani, et. Al.: Sensorless full digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position; IEEE trans. on Industrial Electronics, 46-1, pp.184-191 (1999)

● **IPMSM用に拡張**小坂、宇田、馬場:拡張カルマンフィルタを用いた埋め込み磁石同期モータのセンサレスドライブ;システム制御情報学会論文誌 Vol.17, No.5, pp. 211-217 (2004)

| 📲 Simulink ライブラリ ブラウザー | | | |
|--|---|--|--|
| < 🔶 kalman 🔹 A 💌 🗄 | · · □ · + ③ | | |
| 検索結果: kalman << >> ページ 1/1 (6 個のブロックが見つかりました) | | | |
| <<>>ページ 1/1 (6 個のフロックが見つかりま Commonly Used Blocks Continuous Dashboard Discontinuities Discrete Logic and Bit Operations Lookup Tables Math Operations Model Verification Model-Wide Utilities Ports & Subsystems Signal Attributes | Control System Toolbox - 3 (cstblocks/State Estimation/Extended Kalman Filter) y1 xhat y1 xhat xhat y1 xhat xhat y1 xhat | | |
| Signal Routing Sinks | Extended Kalman Filter Kalman Filter Unscented Kalman Filter | | |
| | h. | | |

本シミュレーションではMATLAB functionブロックを利用



速度制御(電気角速度の制御)位置センサなし (EKFを利用)

Simulinkモデル

- test_IPM_VelCtrl_PosSensorless_ml_sl.m
 - MATLABプログラムとSimulinkモデルの 解析を順番に実行するプログラム
- init_BusObjects.m
 - バスオブジェクトの設定
- init_IPM_VelCtrl_PosSensorless.m
 - モータ、制御器のパラメータの設定
- Results_IPM_VelCtrl_PosSensorless.mat
 - 左記のMATLAB (main_IPM_VelCtrl_PosSensorless.m)の 解析結果
- IPM_VelCtrl_PosSensorless.slx
 - 3相同期モータのセンサレス運転のモデル



モデル



IPM_VelCtrl_PosSensorless.slx 3



拡張力ルマンフィルタ MATLAB Functionブロックを使って、MATLABプログラムをSimulinkモデルに組 み込む方法の一例。





構造体のkaは、MATLAB Functionの中で使う場合には、 「構造体の型」を、予めバスオブジェクトとして設定しておく必 要がある





構造体の型をバスオブジェクトで設定し、MATLAB Functionでその 構造体を使えるようにして、必要な信号はBus Selectorで取り出す







●チューニングの勘所

切替時にシビア(弱め磁束、センサレス起動)

●EVのトレンド 自動運転 ケーブルが重い 情報セキュリティ ↓ (インターネットと接続+車内でも無線化) → モータのノイズ対策が重要

●MATLABシミュレーションの重要性

・制御手法のアイデアの絞り込み(手軽に実行)
 → 有望な手法を実験で検証