

独立電流制御のための零軸電流に着目したスイッチングパターン生成

Switching pattern generation based on zero-axis current for independent current control

電気電子情報通信工学専攻 一色 豪士

Goshi ISSHIKI

1. 緒言

1.1 背景

現在、様々なものが IoT 化され空間知能化の実現が進んでいる。空間知能化の実現にはセンサ、ネットワーク、アクチュエータ、認識など様々な要素技術が重要となる。中でもアクチュエータに焦点を当てると小型化・省配線・高トルク・高効率などが要求されている。本研究室ではそれらの要求に応えるアクチュエータとして DDISA(Direct Drive Intelligent Servo Actuator)を提案し開発を進めてきた [1]。Fig.1 にその概要図を示す。DDISA の特徴として小型(40[mm]×40[mm]×20[mm])、省配線(制御機構や通信機構、センサとの一体化)、高トルク出力(独立電流制御方式による最大トルクの向上)、絶対角度算出(偏心構造を有するエンコーダとの一体化)、ダイレクトドライブ(軽量化・双方向性)がある。

1.2 研究目的

DDISA は空間知能化に要求されるアクチュエータとして開発が進められているが、高効率化に関する研究は行われていない。損失には様々なものがあるがスイッチング回数に依存して発生スイッチング損失を抑えることで低消費電力を抑えることができる。そこで本研究では零軸電流に着目し Sliding 平面を設計及びスイッチングを行い、スイッチング回数を低減させ損失を抑える手法を提案する。提案手法によりロバストな制御及びスイッチング回数の低減が可能となる。

2. 独立電流制御方式

独立電流制御方式とは従来結線方式(デルタ結線・スター結線)とは異なり、結線をせずに各相のコイルに流れる電流を独立に制御する方式である [2]。独立電流制御方式を採用することで従来結線方式とは異なる数学モデルでモータの駆動が可能となる。インバータでの駆動を考慮したモデルからスター結線の 2 倍の最大トルクを実現することができる。これは実機でも検証されており、その結果を Fig2 に示す。

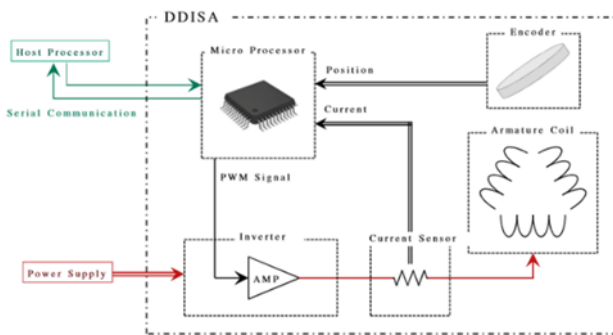


Fig.1 DDISA の概要

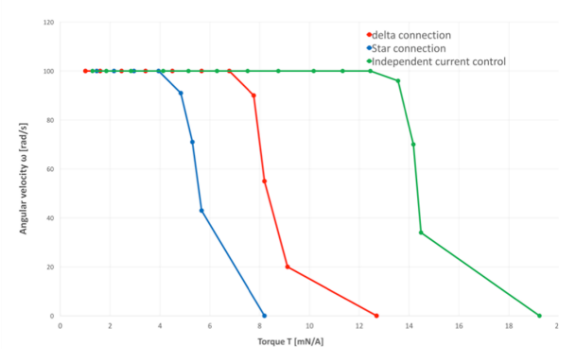


Fig.2 N-T 特性

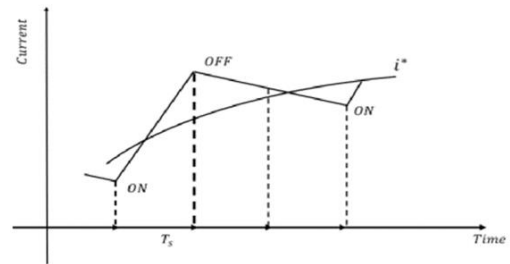


Fig.3 Sliding Mode による電流制御

Fig.2 よりスター結線，デルタ結線，独立電流制御方式それぞれの最大トルク  $T_s$ ， $T_d$ ， $T_i$  の比率は次式のようなになる。

$$T_s : T_d : T_i = 1 : 1.51 : 2.30 \quad (1)$$

実機においても独立電流制御の優位性が示されている。

3. Sliding Mode によるスイッチングパターン生成

Sliding Mode Control とはあらかじめ設計された Sliding 平面  $S$  上に拘束することで所望する状態にする。

例としてこの  $S$  を次式のように設計する。

$$S = \begin{bmatrix} S_u \\ S_v \\ S_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_u^* - i_u \\ i_v^* - i_v \\ i_w^* - i_w \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで  $i_u$ ， $i_v$ ， $i_w$  は各相電流， $i_u^*$ ， $i_v^*$ ， $i_w^*$  は各相電流の指令値である。この  $S$  が正の時オフ、負の時オンにするようなスイッチングを行うことで電流制御が可能である。したがって Sliding Mode では次式で表す拘束条件を常に満たす必要がある。

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (3)$$

符号関数を用いて

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_3 \\ H_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sign}(S_u) \\ \text{sign}(S_v) \\ \text{sign}(S_w) \end{bmatrix} \quad (4)$$

のようにスイッチング関数を定義することで指定した電流が得られる。この時のオンオフの様子を Fig.3 に示す。

一般的に用いられる PWM との違いはサンプリング毎にスイッチングを行うか否かである。Sliding Mode によるスイッチングは状態量から必要に応じてスイッチングを行うことが可能である。

#### 4. 零軸電流に着目したスイッチングパターン生成

##### 4.1 概要

零軸電流 $i_0$ を用いて3章で述べた Sliding 平面を次式のように設計する。

$$S = \begin{bmatrix} S_u \\ S_v \\ S_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(i_u^* - i_u) + \rho \int (i_0^* - i_0) dt \\ L(i_v^* - i_v) + \rho \int (i_0^* - i_0) dt \\ L(i_w^* - i_w) + \rho \int (i_0^* - i_0) dt \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで $L$ はインダクタンス、 $i_0^*$ は零軸電流指令値、 $\rho$ は正のゲインである。拘束条件である式(3)を満たすには

$$\left| \rho(i_0^* - i_0) + L \frac{di_0^*}{dt} + Ri + E \right| < V_{cc} \quad (6)$$

である必要がある。ここで $R$ は巻線抵抗、 $E$ は逆起電力、 $V_{cc}$ は電源電圧である。抗各相が式(6)を満たすように $\rho$ 及び $i_0^*$ を与えることでロバストな電流制御、およびスイッチングパターンの生成が可能となる。

##### 4.2 スwitching回数低減の条件

スイッチング回数低減のための条件を導出する。Fig.4 に Sliding 平面付近の切り替えの模式図を示す。ここで $\Delta$ はチャタリングの振幅、 $T_{on}$ 及び $T_{off}$ はそれぞれオン時間とオフ時間である。Fig.4 より

$$|\dot{S}_{on}| = \frac{\Delta}{T_{on}} \quad |\dot{S}_{off}| = \frac{\Delta}{T_{off}} \quad (7)$$

と算出できるためスイッチング回数 $f$ は次式で求められる。

$$f = \frac{|\dot{S}_{on}| |\dot{S}_{off}|}{\Delta (|\dot{S}_{on}| + |\dot{S}_{off}|)} \quad (8)$$

また u 相に着目すると $|\dot{S}_{on}|$ 、 $|\dot{S}_{off}|$ はそれぞれ

$$|\dot{S}_{on}|_u = V_{cc} + (K_u + \rho i_0^* - \rho i_o) \quad (9)$$

$$|\dot{S}_{off}|_u = V_{cc} - (K_u + \rho i_0^* - \rho i_o) \quad (10)$$

ここで

$$K_u = L \frac{di_u^*}{dt} + Ri_u + E_u \quad (11)$$

である。

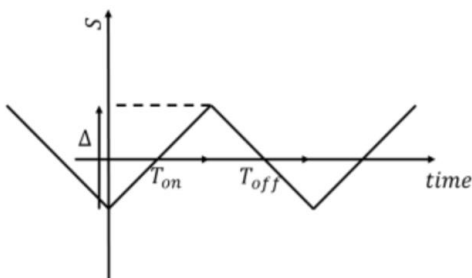


Fig.4 切り替えの模式図

以上より u 相のスイッチング回数 $f_u$ は

$$f_u = \frac{-\rho^2 i_0^{*2} + 2(\rho^2 i_0 - \rho K_u) i_0^* - \rho^2 i_0^2 + 2\rho K_u i_0 - K_u^2 + V_{cc}^2}{2\Delta V_{dc}} \quad (12)$$

と導出することができる。これは v 相, w 相についても同様である。したがって各相のスイッチングの合計 $F$ は

$$F = \frac{-3(i_0^* - i_0)^2 \rho^2 - 2K_{sum}(i_0^* - i_0)\rho - K_{sum}^2 + 3V_{cc}^2}{2\Delta V_{cc}} \quad (13)$$

ここで

$$K_{sum} = K_u + K_v + K_w \quad (14)$$

である。零軸電流指令を 0 とし、式(14)を $\rho$ について偏微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial F}{\partial \rho} = \frac{-3(i_0^* - i_0)^2 \rho + K_{sum}}{\Delta V_{cc}} \quad (15)$$

三相平衡であるならば $K_{sum}$ は 0 と近似することができるため、 $\rho = 0$ で式(15)は 0 となることが分かる。つまりスイッチング回数 $F$ と $\rho$ の関係は Fig.5 のようになる。したがって $\rho$ の値を大きくすることでスイッチング回数 $F$ が小さくなることが分かる。

以上よりゲイン $\rho$ は拘束条件である式(6)を満たし、その値を大きくすることでロバストな制御及びスイッチング回数の低減が可能である。しかしスイッチング回数低減とチャタリングはトレードオフであるため、モータ駆動への影響を考慮しながら設計を行う必要がある。

#### 5. 提案手法の検証

##### 5.1 シミュレーションによる検証

提案手法による電流制御及びDDISAの駆動のちみゅレーションを行う。まず $\rho$ の値を変え電流制御を行いスイッチング回数及び誤差を評価する。その結果を Fig.6 と Fig.7 に示す。

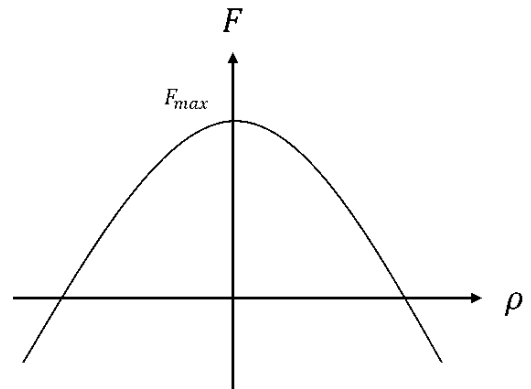


Fig.5  $F$ と $\rho$ の関係

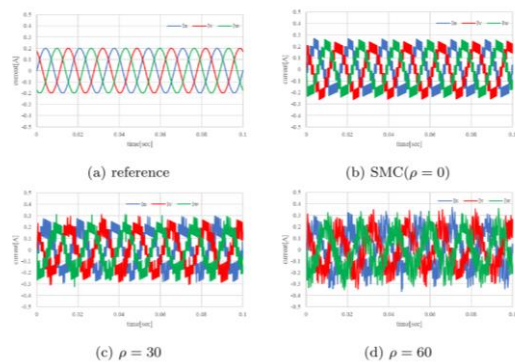


Fig.6 提案手法による電流制御

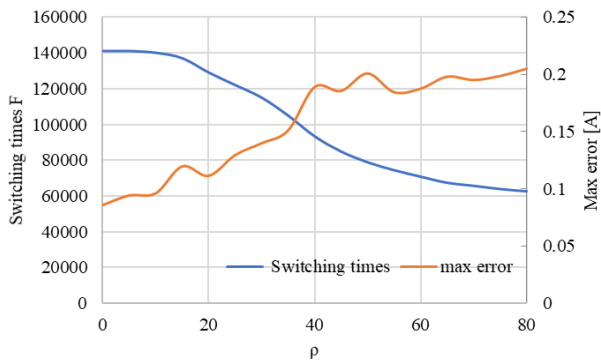


Fig.7 スイッチング回数と最大誤差

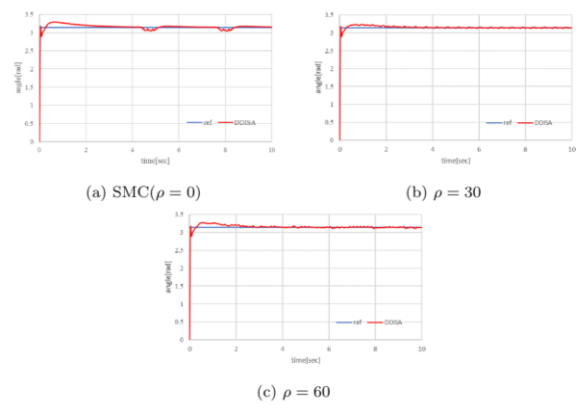


Fig.10 提案手法による角度制御

$\rho$ を大きくすることでスイッチング回数の低減がみられるがチャタリングの増加により最大誤差も大きくなることが確認できる。

次に提案手法によるDDISAの駆動のシミュレーションを行う。 $\rho$ の値は比較のための0とチャタリングの影響も考えた30, スイッチング回数の低減のみを考量した60でシミュレーションを行った。提案手法によるDDISA駆動も概要図をFig.8に示す。シミュレーションは速度制御と角度制御を行った。速度制御の結果をFig.9に角度制御の結果をFig.10に示す。また $\rho = 0$ の時を基準としたスイッチング回数の低減率及びMSE(最小二乗誤差)をTable.1とTable.2に示す。

Table.1 速度制御結果

	$F$ reduction rate	MSE
SMC( $\rho = 0$ )	-	$8.4 \times 10^{-2}$
$\rho = 30$	80.1%	$2.3 \times 10^{-2}$
$\rho = 60$	37.0%	$4.2 \times 10^{-2}$

Table.2 角度制御結果

	$F$ reduction rate	MSE
SMC( $\rho = 0$ )	-	$1.8 \times 10^{-2}$
$\rho = 30$	75.1%	$1.5 \times 10^{-2}$
$\rho = 60$	36.4%	$1.6 \times 10^{-2}$

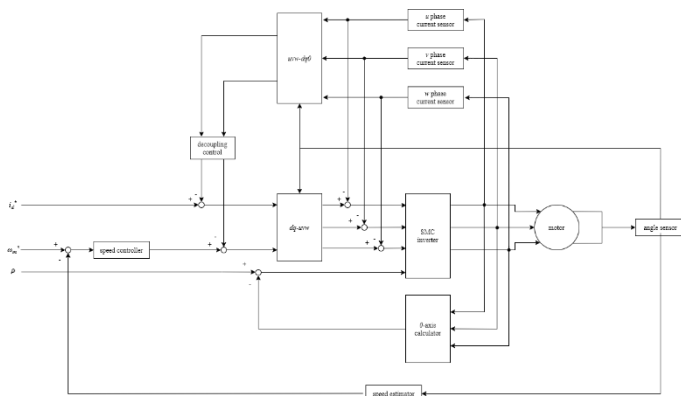


Fig.8 提案手法によるDDISA駆動の概要図

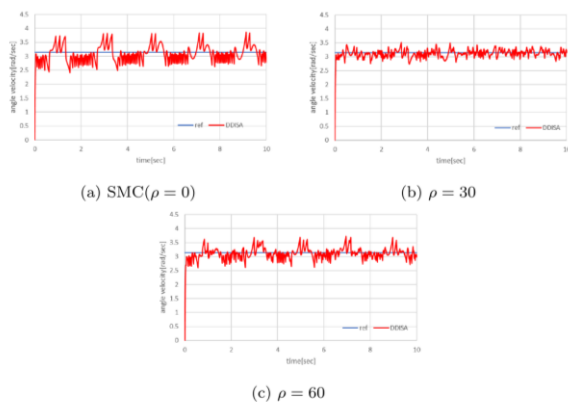


Fig.9 提案手法による速度制御

## 5.2 サンプルング時間とチャタリング

本手法を含む Sliding Mode Control はサンプルング時間の影響を強く受ける。その影響を調べるためサンプルング周波数を変更して電流制御を行った。サンプルング周波数と最大誤差の関係をFig.11に示す。

Fig.11 よりサンプルング周波数が高いほど誤差が小さくなっており、サンプルング周波数は40[kHz]以上が望ましい。この値をもとに実機検証の準備を行う。

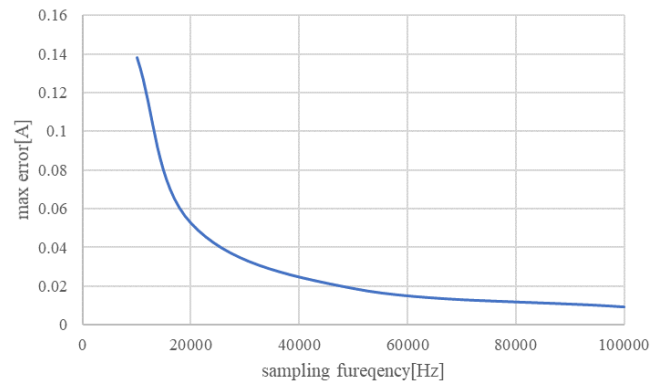


Fig.11. サンプルング周波数と最大誤差

### 5.3 実機検証

提案手法の有用性を実機で検証を行う。Fig.11 で得られた結果から実験に用いるマイコンを決定した。そのスペックを Table.3 に示す。また DDISA のパラメータを Table.4 に示す。実機による電流制御の結果とその時のスイッチング回数を Fig.12 と Fig.13 に示す。

実機においても電流制御及び $\rho$ を大きくすることによるスイッチング回数の低減を確認することができた。

Table.3 マイコンのスペック

品番	STM32746G
CPU	Core M7
動作周波数	215 MHz
AD	12 bit
サンプリング周波数	40kHz

Table.4 DDISAのパラメータ

パラメータ	値
電源電圧	12[V]
巻線抵抗	0.34[Ω]
端子間インダクタンス	0.27[mH]
極対数	4
逆起電力定数	$2.2 \times 10^{-3}$ [V/rpm]
トルク定数	$2.2 \times 10^{-3}$ [Nm/A]
粘性抵抗	$1.0 \times 10^{-3}$ [Nm/(rad/s)]
ロータイナリーシャ	$8.0 \times 10^{-7}$ [kg m <sup>2</sup> ]
負荷トルク	$5.0 \times 10^{-2}$ [mNm]

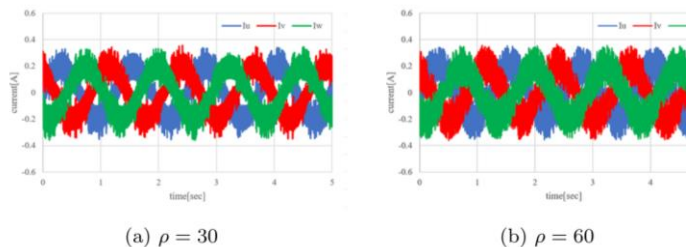


Fig.14. 提案手法による電流制御(実機)

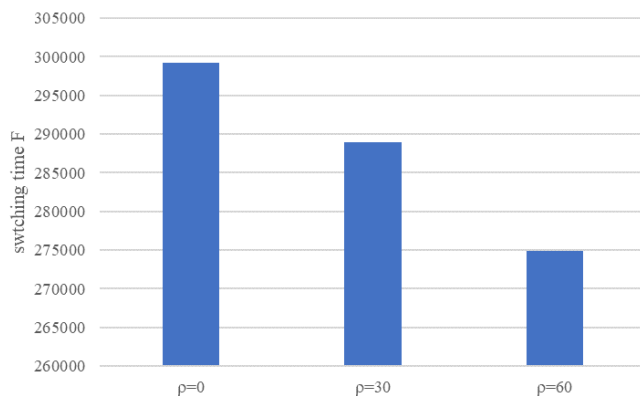


Fig.13. スイッチング回数(実機)

### 7. 結言

本研究では、零軸電流に着目し Sliding Mode によるスイッチングを行うことでスイッチング回数を低減する手法を示した。 $\rho$ の値を変更することで容易に設計を行うことができる。また $\rho$ を大きくすることで電流のチャタリングも大きくなるがよりロバストな制御が可能となる。DDISA の駆動から $\rho$ が0の時より30の場合の方が誤差は小さくなる。また60のときに誤差が増えるのはチャタリングの影響が大きくなるためだと思われる。また本手法の有用性は実機においても確認できた。また Sliding Mode はサンプリング時間の影響を強く受ける。サンプリング周波数がある程度大きくすることで電流の誤差(チャタリング)は小さくなることをシミュレーションから確認した。一般的に使用されている PWM 制御と同等の駆動を行うには 40kHz 以上のサンプリング周波数が望ましいと思われる。

### 参考文献

- [1] 山本 航大, 新井 一博, 大友 一輝, 北 直樹, 石井 眞二, 橋本秀紀: ``ダイレクトドライブインテリジェントサーボアクチュエータの提案'', 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 1X2-06, (2016.9)
- [2] Keita Akiho, Yuki Nagatsu and Hideki Hashimoto : Study on Sliding Mode Switching Pattern Generation Focusing on Neutral Point Voltage , IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2018), TT10-4, 2018.3, Tokyo.
- [3] Vadim I. Utkin : ``Variable structure systems with sliding modes'', IEEE Transactions on Automatic Control, Volume 22, Issue 2, pp.212 - 222 (1977)
- [4] Ahmet Cakanel and Vadim I. Utkin : ``Frequency control of DC/AC inverter'', IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), (2016)
- [5] Chiew Tsung Heng and Zamberi Jamaludin and Ahmad Yusairi Bani Hashim and Nur Aidawaty Rafan, and Lokman Abdullah : ``Design of super twisting sliding mode control for single axis direct drive motor'', 14th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision (2016)
- [6] Satoshi Qgasawara and Michiaki Nishimura and Hirofumi Akagi and Akira Nabae : ``Current-Controlled PWM Inverters Having High Speed Current Response and Low Harmonic Currents'', The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan.B, Volume 106, Issue 2, pp. 89-96 (1986)
- [7] Katsuhiro Asano and Shigenobu Okada and Yuzuru Tsunehiro : ``Evaluation and Improvement of the Current Control System with DC Brushless Motor'', IEEJ Transactions on Industry Applications, Volume 108, Issue 11, pp. 1033-1040 (1988)
- [8] Y. Ono : ``Control system of DD motor and its characteristics'', Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.7, No.3, pp.254-259, (1989)
- [9] 大友 一輝, 出口祐輔, 石井 眞二, 橋本秀紀: ``偏心構造を用いた高性能な磁気式エンコーダの開発-多極化とセンサ数増加による性能向上-'', 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2018.12)