本ドキュメントは Cypress (サイプレス) 製品に関する情報が記載されております。本ドキュメントには、「MB」から始まるシリーズ名，品名およびオーダ型格が記載されておりますが、これらはすべて「CY」から始まるシリーズ名，品名およびオーダ型格として、新規および既存のお客様に引き続き提供してまいります。

オーダ型格の調べ方について

1. www.cypress.com/pcnにアクセスしてください。
2. SEARCH PCNS フィールドに、オーダ型格などのキーワードを入力し、「Apply」をクリックしてください。
3. 該当するタイトル(Title)をクリックしてください。
4. 「Affected Parts List」ファイルを開いてください。
   当該ファイルに記載されている各種変更情報をご利用ください。

詳しいお問い合わせ先

Cypress 製品およびそのソリューションの詳細につきましては、お近くの営業所へお問い合わせください。

サイプレスについて

サイプレスは、世界で最も革新的な車載や産業機器、スマート家電、民生機器および医療機器製品向けに、最先端の組み込みシステム ソリューションを提供するリーディング カンパニーです。サイプレスのマイクロコントローラーや、アナログ IC、ワイヤレスおよび USB ベースのコネクティビティ ソリューション、高い信頼性と高性能を提供するメモリ製品は、各種機器メーカーの差異化製品の開発と早期市場参入を支援します。サイプレスは、ベストクラスのサポートと開発リソースをグローバルに提供することで、彼らが従来市場を破壊しまったく新しい製品カテゴリを歴史的なスピードで市場投入できるよう支援します。詳細はサイプレスのウェブサイト (japan.cypress.com) をご覧ください。

AN209182

PMSM サーボモータスピード制御

このドキュメントは、CYPRESS FM4 ファミリ MCU におけるサーボモータ制御について記載しています。記載には、全体システム領域, ハードウェア設計, ソフトウェア設計, 効果も含みます。

Contents

1 導入 1
1.1 目的.....1
1.2 定義，頭字語，略語.....1
1.3 ドキュメント概要 2
2 PMSM 制御理論 2
2.1 3 相 PMSM の構造 2
2.2 FOC 原理 3
2.3 FOC 制御構造.....5
2.4 インクリメンタルエンコーダ説明 6
3 システム領域 7
4 ハードウェアデザイン.....8
5 ソフトウェアデザイン.....9
5.1 ファームウェアファイル構造 9
5.2 制御実装 10
6 効果 14
6.1 電流波形 15
6.2 スピード加速　減速.....16
6.3 ブレーキ 17
7 付加情報.....17
8 改訂履歴.....18
セールス, ソリューションおよび法律情報.....19

1 導入

1.1 目的

このドキュメントは、CYPRESS FM4 ファミリ MCU におけるサーボモータ制御について記載しています。記載には、全体システム領域，ハードウェア設計，ソフトウェア設計，効果も含みます。

FM4 MB9B560R シリーズと S6E2HG シリーズ MCU はすべて対象とします。

1.2 定義，頭字語，略語

HW : Hardware, この文書では、インバータプラットフォームハードウェアボードを意味します。

FW : Firmware

PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor

FOC : Field-oriented control

AC : Alternating Current

DC : Direct Current

PID : Proportion Integration Differentiation

SVPWM : Space Vector Pulse Width Modulation

MFT : Multi-function Timer

1.3 ドキュメント概要

ドキュメントのその他の部分は、以下の様に構成されます。

2 章で PMSM 制御理論を説明します。

3 章でシステム領域を説明します。

4 章でハードウェア設計を説明します。

5 章でソフトウェア設計を説明します。

6 章で効果を説明します。

2 PMSM 制御理論

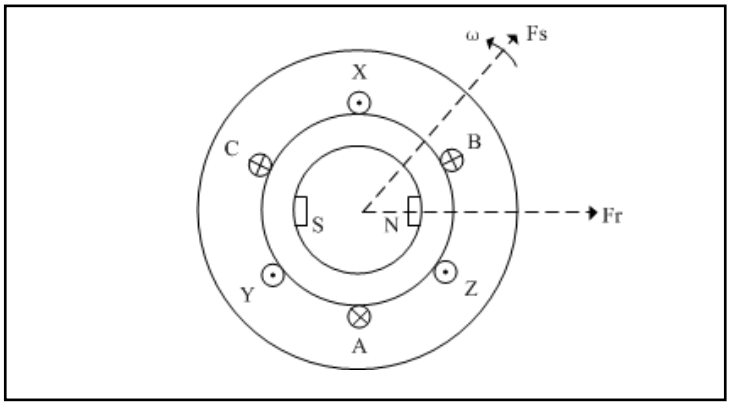
2.1 3 相 PMSM の構造

3 相 PMSM は主に次の 2 つの部位で構成されます：固定子と回転子

固定子側は、3 相巻線が固定子コアにらせん状に巻かれています。3 相 AC 電流が 3 相巻線を流れる時に回転磁場 (Fs) を生成するように、120 度角のルールに従って 3 相巻線は個別に配置されます。120 度のルールに従って個別に配置された 3 相巻線は、3 相対称巻線と呼ばれます。

回転子側は、一定の回転子磁場 (Fr) を作り出すため、1 つかそれ以上のペアの永久磁極が実装されています。

図 1. 3 相 PMSM の構造

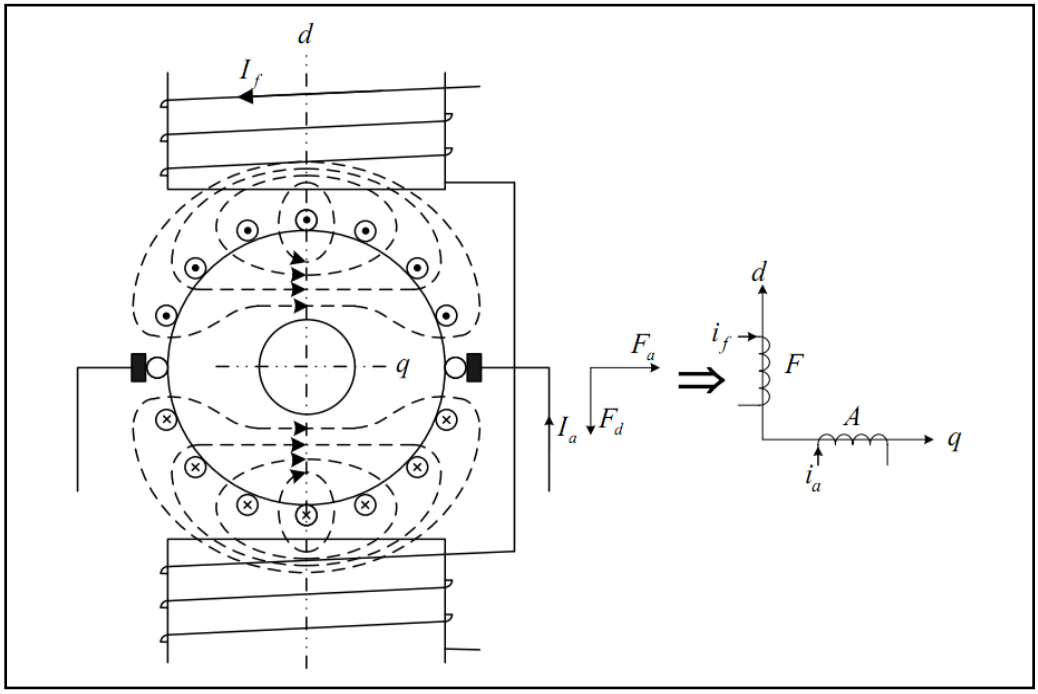


Fs は回転磁場なので、Fr は Fs に従って引きずられます。Fr が Fs に追いつけない場合は、回転子は連続して回転します。3 相巻線中の 3 相電流が消えた場合は、同時に Fs も消え、回転子は止まります。

2.2 FOC 原理

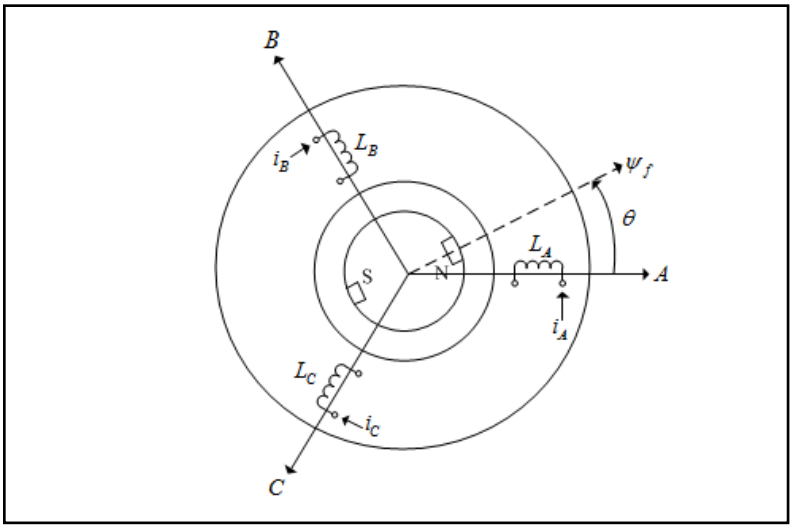
ブラシ付き DC モータは長い歴史を持つ伝統的な DC モータです。ブラシ付き DC モータの大きな利点は、トルク制御と磁化制御が分離されていることで、これによりブラシ付き DC モータの制御を容易にします。ブラシ付き DC モータの分離制御を以下の図に示します。

図 2. ブラシ付き DC モータ分離制御



磁化は磁化電流 (I_f) によって制御され、トルク制御はトルク電流 (I_a) によって制御されます。磁化制御による磁場の方向は d 軸 (垂直方向) と並行で、トルク磁場の方向は q 軸 (水平方向) と並行になります。そのため、これら 2 つの磁場はお互いに影響しません。つまり、2 つの磁場は分離され、モータの磁化とトルクは個別に調整可能です。たとえば、トルク制御式は$T_e = C_m \emptyset I_a$で、これはトルクがトルク電流I_aのみによって制御されることを意味します。PMSM モータ制御の調整はブラシ付き DC モータよりずっと複雑です。3 相対称巻線の磁場は結合した磁場です。トルク制御式から複雑な結合関係を明らかにできます。

図 3. PMSM の結合磁場流れ



$$T_e = \frac{1}{2} n_p [I_{ABC}]^T \frac{\partial [L_{ABC}]}{\partial \theta} [I_{ABC}] \ldots (3.1.1-1)$$

$$[L_{ABC}] = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix} (M \text{ is mutual inductance}), [I_{ABC}] = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Te の式から、トルクが 3 相インダクタンス（自己インダクタンス，相互インダクタンスを含む）と電流から決まることが容易に理解できます。あきらかに、トルク制御はブラシ付き DC モータよりもずっと複雑であることがわかります。

座標変換が PMSM トルク制御を簡単化するために使われます。座標変換により、PMSM 制御モデルは A-B-C 座標から d-q 座標に変換されます。トルク制御式も d-q 座標に変換され、式は以下のようになります。

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_d I_q \ldots (3.1.1-2)$$

d-q 座標の簡単な式により、PMSM トルク制御がブラシ付き DC モータ同様に簡単になります。

2.3 FOC 制御構造

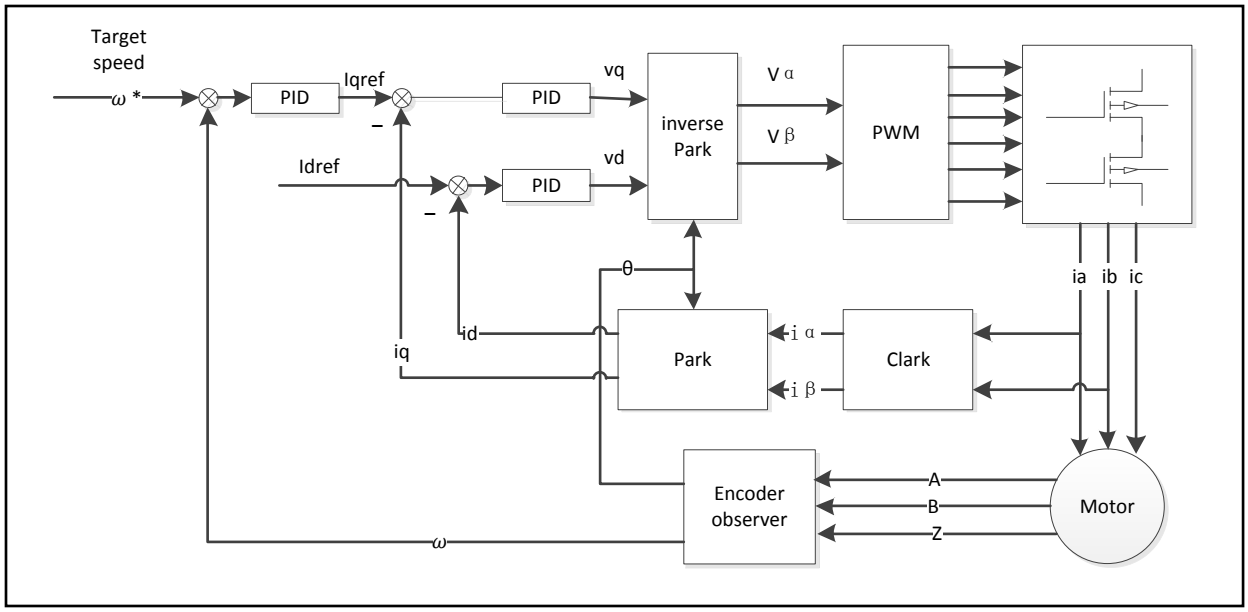
上記の説明のように、FOC の要点は、モータ回転子磁場配向技術により、PMSM のトルク制御をブラシ付き DC モータと同程度に簡単にすることです。この技術において、座標変換法により、モータモジュールが u-v-w 座標から、回転 d-q 座標に移され、d-q 座標回転スピードは固定子磁場回転スピードと同じとなります。そうして PMSM の制御性能がブラシ付き DC モータとほとんど同等に簡略化されます。

いくつかの PID レギュレータが、与えられた入力にモータ出力を追従させるために追加されています。異なる PID パラメータを設定することで、システムは様々な静的, 動的特性となります。

α-β 座標におけるドライブ電圧を受け入れ、フルブリッジインバータ中の 6 つのスイッチを制御するスイッチング命令セットを出力するために SVPWM 技術が適用されています。

位置, スピード見積もり器により、モータドライブ電圧と電流により決まるリアルタイムでのモータスピードが観察されます。見積もられたモータスピードは、スピードの期待値と比較され、その比較結果は、スピード PI レギュレータの入力となります。見積もられた回転子位置角は、座標変換ユニットにより使用されます。

図 4. FOC 制御図



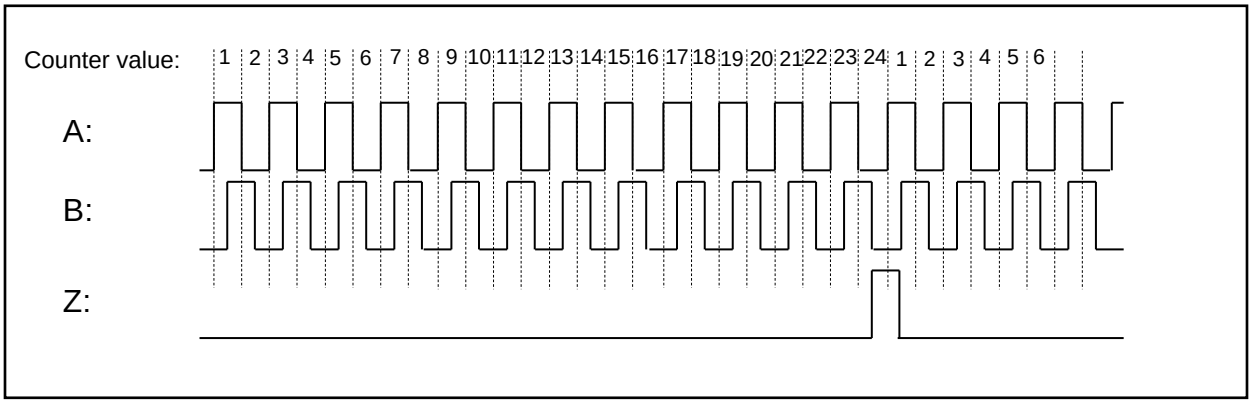
2.4 インクリメンタルエンコーダ説明

直交位置エンコーダは次の 2 つのタイプの信号を扱います。直交位相信号 A と B、そしてゼロマッチ信号 Z です。

Z 信号は機械的サイクルー周期ごとに現れます。これは、回転周期の計算や、モータ位置見積もり値の修正に使用されます。

A, B のパルスの積分により、モータ位置が見積もられます。エンコーダペリフェラルは MCU (MB9B560R シリーズおよび S6E2HG シリーズ) に A, B 信号をカウントするために組み込まれます。信号 A と B は回転子の位置を示し、その周波数は位置精度に関係します。

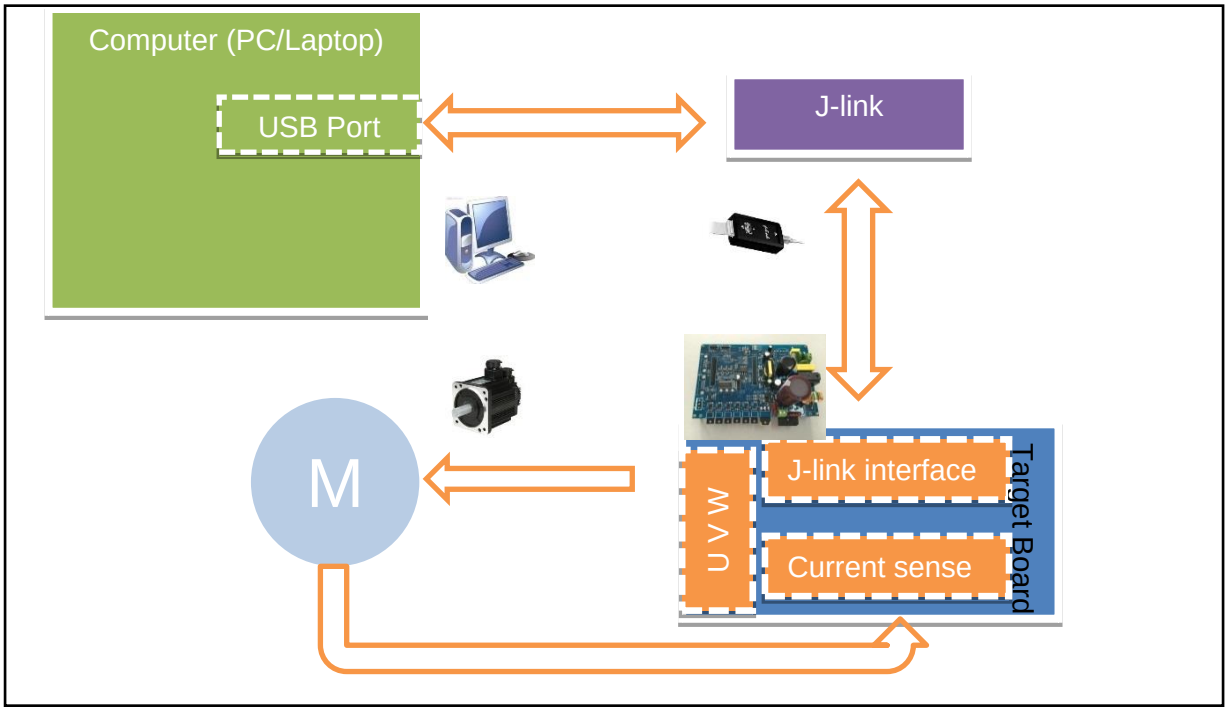
図 5. エンコーダ信号



3 システム領域

モータドライブシステムに同期した 3 相永久磁石がここで記載されており、システム構成とドライブ性能が以下に示されます。

図 6. システム構成



- 160MHz メインクロックおよび 80MHz 全バスクロックが設定された MB9BF568X および S6E2HG が想定するコントローラです。
- 1 サイクルで 360 個のパルスを発するインクリメンタル・エンコーダ付きモータ
- 以下が全システム仕様
  - サンプリング用 3 相ホール電流センサ
  - 高，定電圧供給完全分離
  - オートゼロ信号位置検出
  - 広いスピードレンジ: 100rpm ~ 3500rpm
  - 200ms 以内の、0rpm から 3500rpm までの急加速
  - 300ms 以内の、3500rpm から 0rpm までの急減速
  - 弱め界磁制御はこのシステムでは実施しない
  - 目標値誤差 1%以内の正確なスピード制御
  - 双方向回転
- ファームウェア開発環境
  - Windows XP および上位バージョン
  - IAR 7.3

4 ハードウェアデザイン

サーボモータコントロールのハードウェア設計は、通常のモータ制御ハードウェア設計と異なります。サーボモータは工業用制御が適用されます。

ハードウェア設計に関するドキュメントは、ハードウェア設計アプリケーションノートを参照願います。

ハードウェアに関してのいくつかの仕様を列記します。

- AC-DC 電源
- 3 つのシャント電流試料
- J-LINK 接続サポート
- 複合ホールセンサインタフェース (HA, HB, HC, 5V, GND)
- 複合エンコーダインタフェース (AIN, BIN, ZIN, 5V, GND)
- モータ制御のための IPM

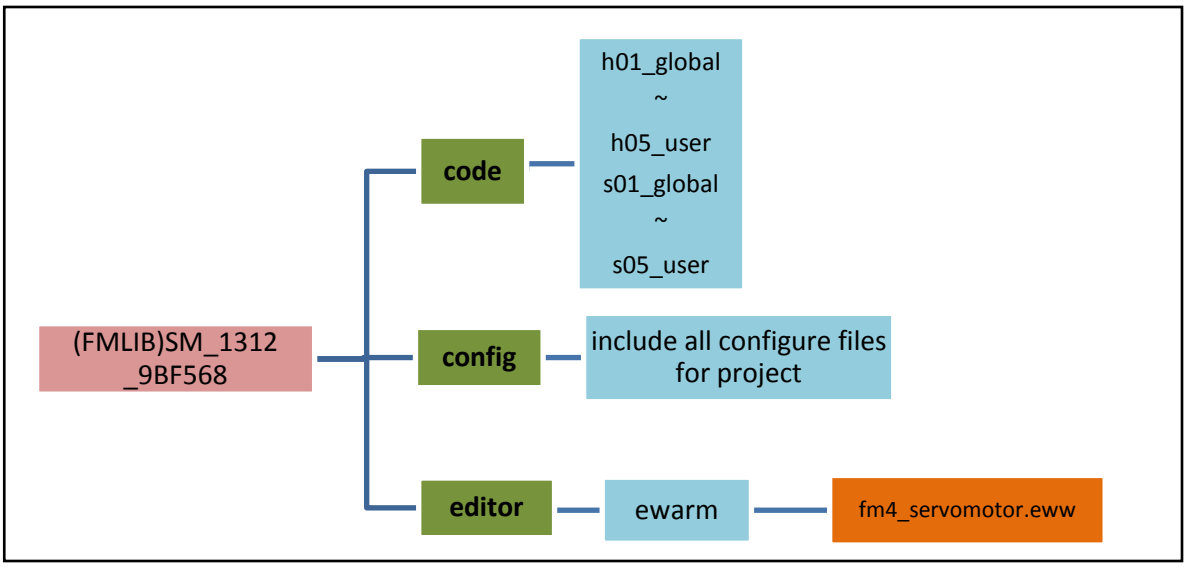
5 ソフトウェアデザイン

この章では、サーボモータスピード制御の実現方法について記述します。ファームウェアバージョン，ファームウェア構造と制御プロセスは随所にて説明します。

5.1 ファームウェアファイル構造

以下の図は、ファームウェアファイル構造を示します。

図 7. ファームウェアファイル構造



ファームウェアは次の 3 つのサブフォルダを含みます: code, config, editor

すべてのソースコードは、ヘッダ, C ソースも含め、code フォルダに保管されています。

コンフィグレーション・ファイルと、MCU 記述ファイルは config フォルダに保管されています。

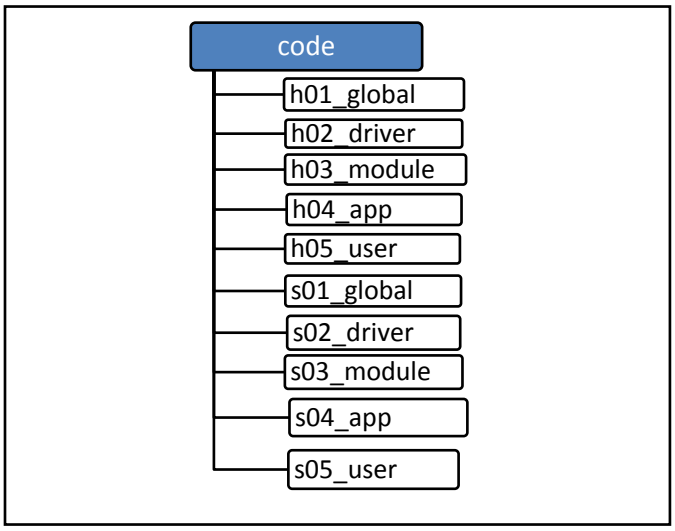
プロジェクトを開くためには、“FM4_ServoMotor.eww” ファイルをダブルクリックしてください。

Code フォルダ紹介

ソースコードは機能により 5 つの異なるタイプに分けられ、5 つの異なるフォルダに保管されます。

5 つの層は “global”, “driver”, ”module”, “app” そして “user” と各々名付けられています。

図 8. コードフォルダ構造



Global 層は空です。

Driver 層には MCU ヘッダファイルとマクロ定義ファイルが保管されています。

Module 層には、 独立した関数が保管されています。

App 層は実際のプロジェクトに関連します。このフォルダの関数は様々なシステムに合わせて変更可能です。

User 層は設定, デバッグ用にユーザに開放されています。

5.2 制御実装

この章では、最初にファームウェアで使われるペリフェラルと割込みについて、次に制御プロセスフローについて説明します。

5.2.1 ファームウェア中のペリフェラル

ファームウェア中で使われるすべてのペリフェラルはフォルダ “s05_user” 中の “init_mcu.c” で設定されます。ペリフェラル初期化詳細は、MCU データシートを参照願います。

表 1. ファームウェア中のペリフェラル

ペリフェラル	ファームウェア中での機能
clock	システムメインクロックと、バスクロックの設定
NVIC	割り込み設定可，不可，優先順位の設定
QPRC	モータ位置検出のためのカウントエンコーダ信号パルス
base timer	モータ現速度計算のための、エンコーダ信号幅測定
ADC	相電流サンプリングに使われる。ADC unit 0 が使われます。
Multi-function timer(MFT)	モータ運転のための 3 ハーフブリッジを制御するため PWM 信号を生成する。MFT unit 0 が使われます。
Watch dog	プログラム暴走時に MCU をリセットします。

- クロック設定
  SCM_CTL: システムクロックモード制御
  BSC_PSR: ベースクロックモード制御
  APBC0_PSR: APB0 プリスケーラレジスタ
  APBC1_PSR: APB1 プリスケータレジスタ
  APBC2_PSR: APB2 プリスケーラレジスタ
- NVIC 設定
  NVIC_SetPriority(IRQn, x): 優先度設定
  NVIC_EnableIRQ(IRQn): 優先設定許可設定
  IRQn: irq 番号
  x: 優先度番号を表示します。
- QPRC 設定
  PC_Mode2 と RC_Mode0 が選択されます。
  QCR: QPCR 制御レジスタ
  QICRL: QPCR 割込み制御レジスタ
- ベースタイマ設定
  このファームウェア中で PWC 機能が選択されます。
  TMCR: タイマ制御レジスタ
  STC: ステータス制御レジスタ
  DTBF: データバッファ制御
- ADC 設定
  このファームウェア中でスキャン割込み許可します。優先モード割込みは使用されません。
  ADCR: ADC 制御レジスタ
  ADSR: ADC ステータスレジスタ
  SCCR: スキャン変換制御
- MFT 設定
  このファームウェア中で FRT, OCU, WFG および ADCMP が使われます。
  詳細な設定は MCU データシートを参照してください。
  FRT はアップ，ダウンカウントモードを選択する。デッドタイム付き WFG の相補出力が選択されます。
- ウォッチドッグ設定
  WdogControl: ソフトウェアウォッチドッグタイマ制御レジスタ
  WDG_CTL: ハードウェアウォッチドッグタイマ制御レジスタ

5.2.2 ファームウェア中の割込み

以下の表はシステム中で使われる割込みを示します。関数 “init_mcu.c” 中の “InitMcu_Nvic()” は割込み制御に使われます。

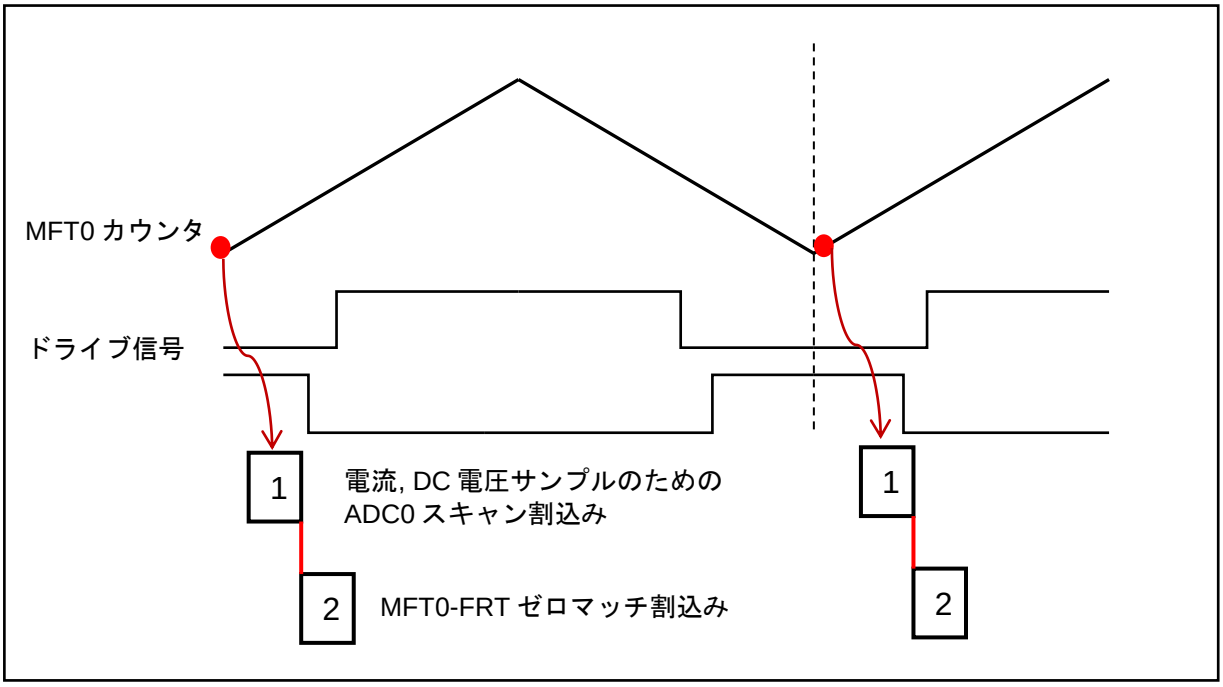
割込み制御のより詳細に関しては、ドキュメント “Cotex-M4 Technical Reference Manual” を参照願います。

表 2. ファームウェア中の割込み

割り込みタイプ	ファームウェア中での機能
Multi-function timer zero match interrupt	この割り込みで FOC アルゴリズムが実行されます。
ADC scan interrupt	DC 電圧と 3 相電流のサンプリング用。MFT zero matching によりトリガがかかります。
Multi-function timer DTIF interrupt	ハードウェア過電流保護用
Software watch dog interrupt	ソフトウェアウォッチオーバフロー時、モータが運転を停止します。

- 優先度設定のためには、下位の方が優先度が低く、上位の方が優先度が高くなります。
  NVIC_SetPriority(ADC0_IRQn,1)
  NVIC_SetPriority(FRT0_ZERO_IRQn,2)
  上記設定により、ADC0_IRQn の優先度は FRT_ZERO_IRQn より高いです。
  MFT と ADC 割込み実行例を以下に示します。MFT と ADC 割込みは、モータ制御に関するすべての関数を含みます。
  MFT と ADC 割り込みは PWM サイクルごとにトリガがかかります。

図 9. ファームウェア中の割込み処理コール関係

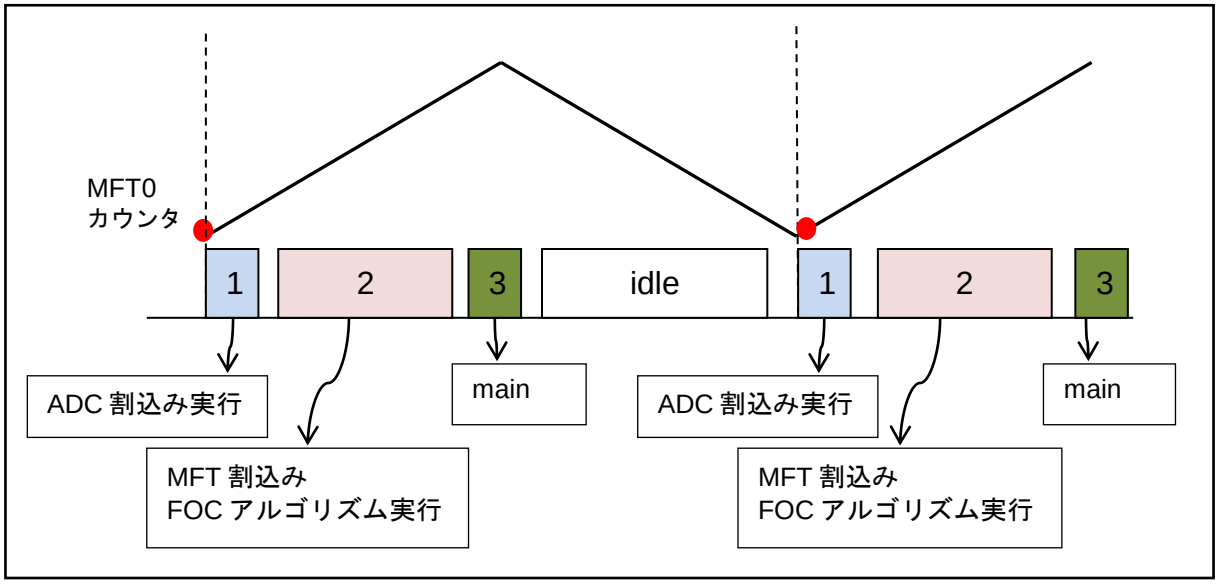


5.2.3 制御プロセスフロー

ADC 割込み優先度の方が、MFT zero-match より高いため、基本的な制御理論は以下のようになります。

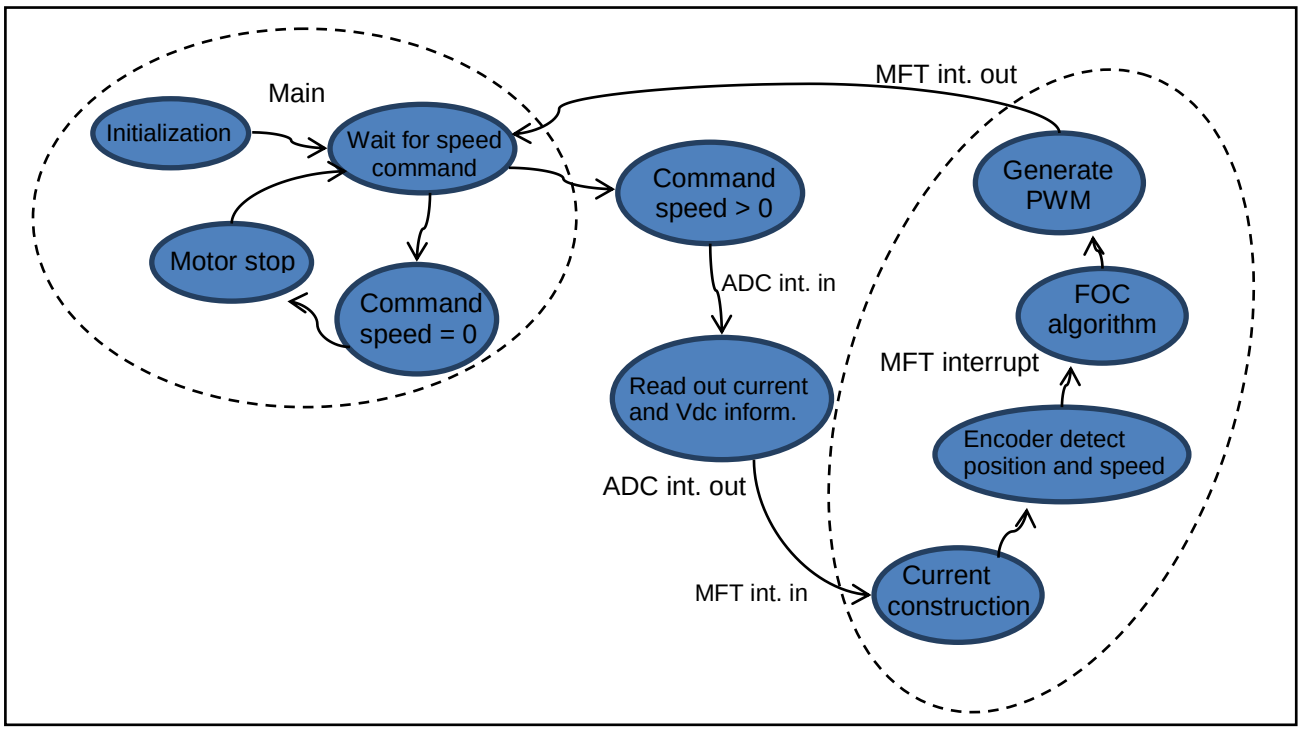
制御プロセスに関するメインフローには次の 3 つの主要な部分を含みます。ADC 割込み，MFT 割込み，および main 関数。

図 10. 制御フロー図



制御プロセスステート図を以下に示します。

図 11. ファームウェアステート図



6 効果

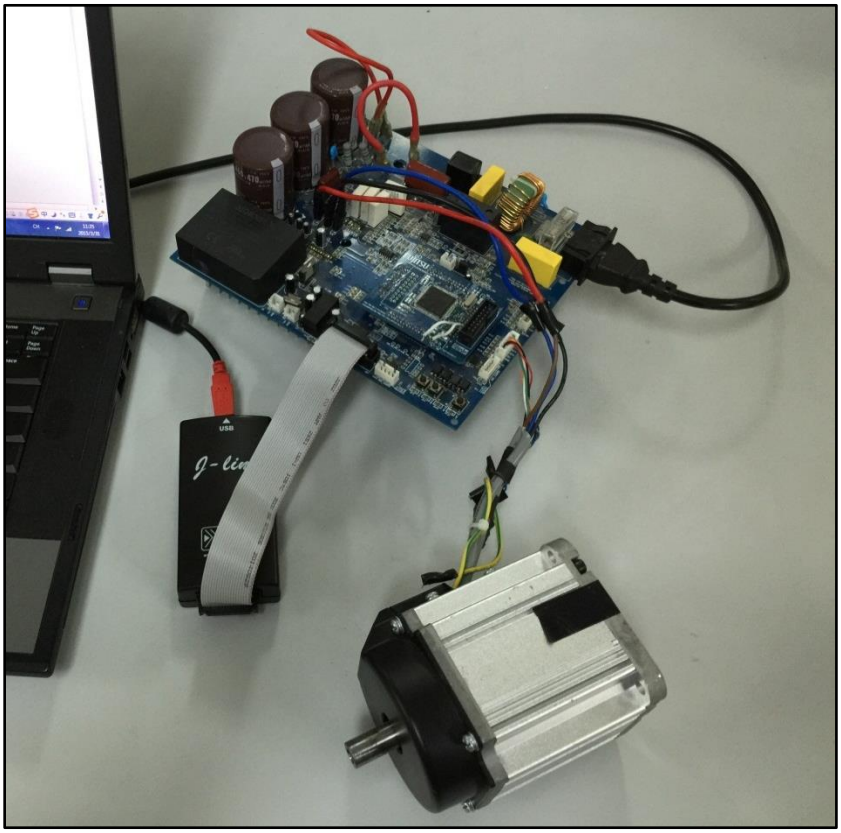
すべての効果は 360 エンコーダパルス使用モータにもとづきます。モータパラメータを以下の表に示します。

表 3. テストパラメータ

モータパラメータ	最大値	単位
相電流（ピーク）	15	A
スピード範囲	100~5000	rpm

全システム接続状態を以下に示します。

図 12. システム接続図



6.1 電流波形

100rpm, 1800rpm および 3500rpm 電流波形を以下に示します。相電流のピーク値は 300mA 以下です。

図 13. 100rpm でのモータ相電流

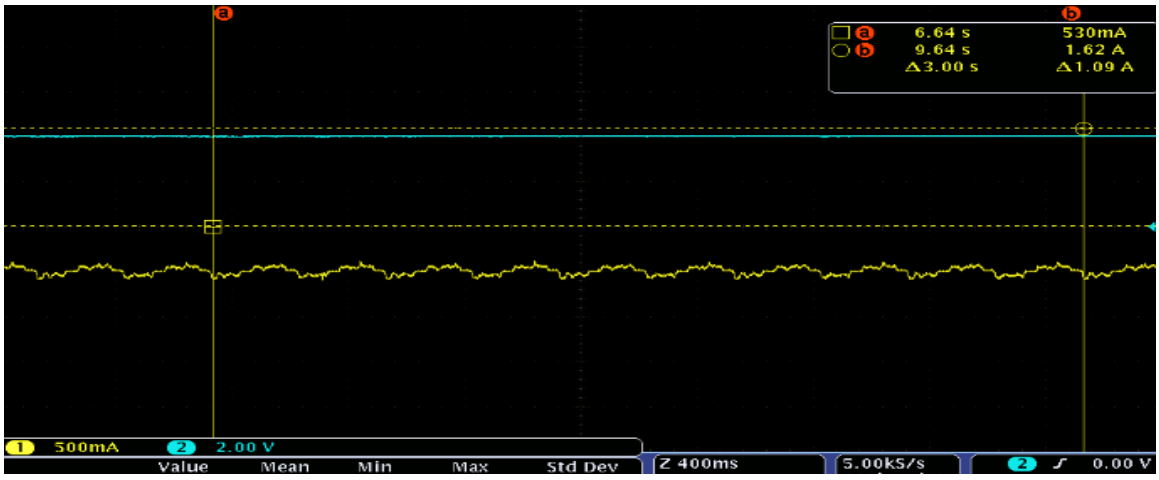


図 14. 1800rpm でのモータ相電流

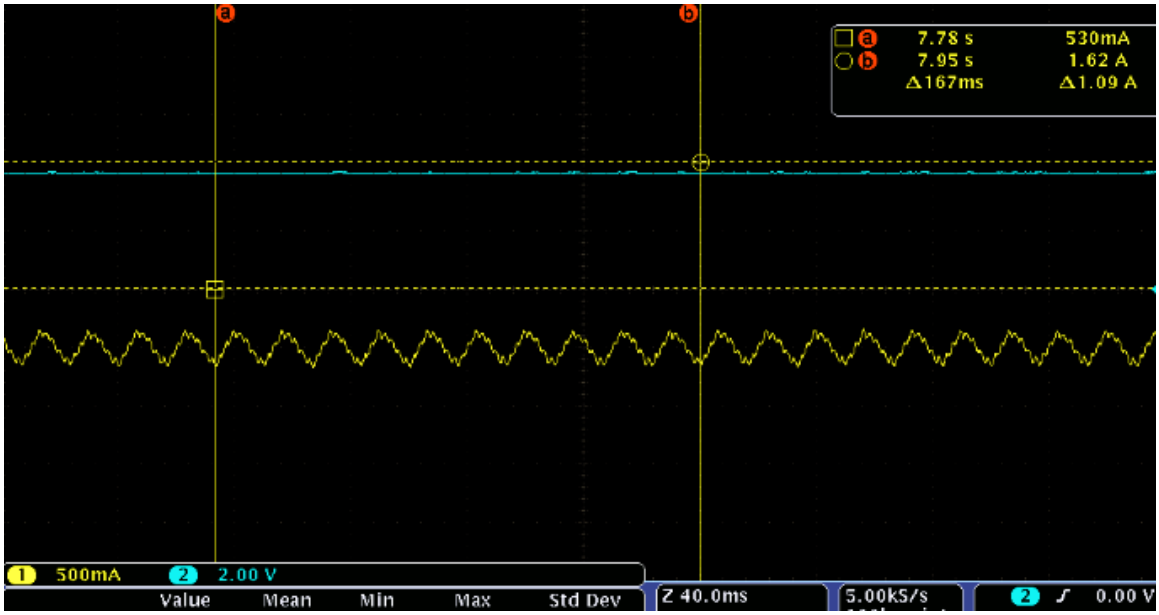
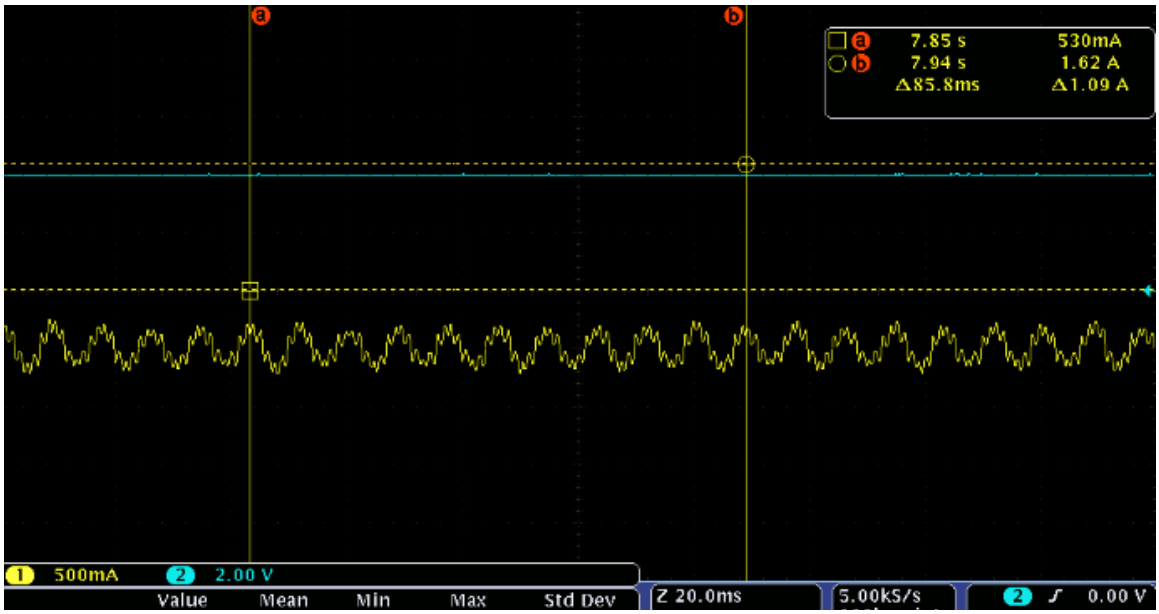
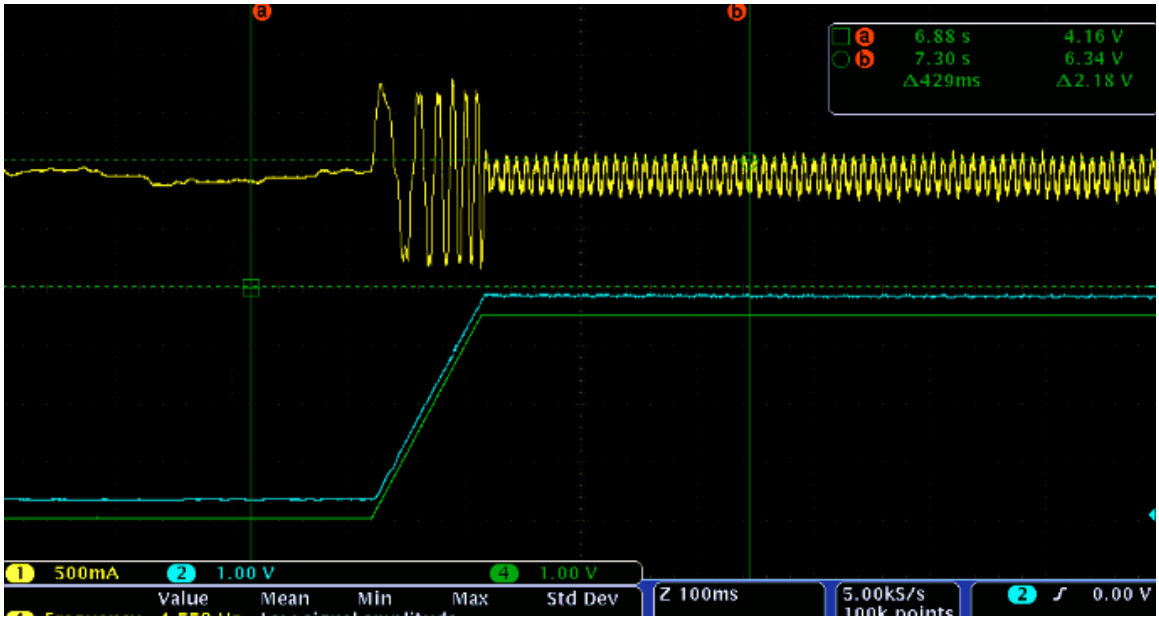


図 15. 3500rpm でのモータ相電流



6.2 スピード加速　減速

図 16. 200ms 以内に 100rpm から 3500rpm まで加速した場合のモータ相電流

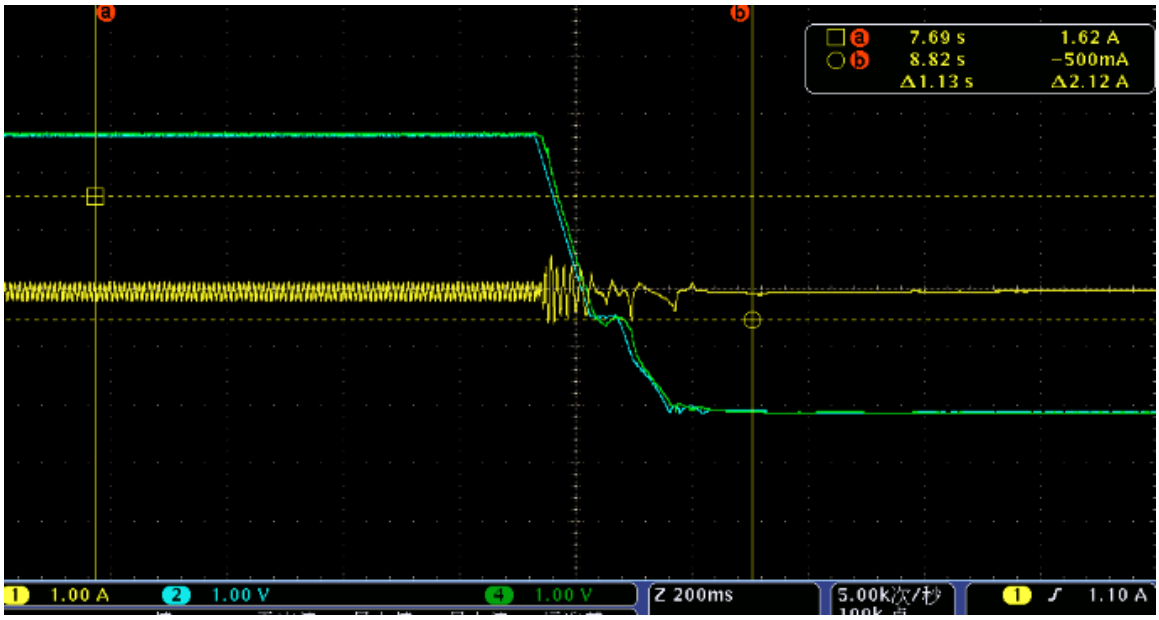


- 緑の線がモータの目標スピードを示します。
- 青の線がエンコーダ信号より見積もったモータスピードを表します。
  100rpm から 3500rpm までのモータスピード加速が 200ms 以内に制御されています。また、スピードのオーバシュートは顕著ではありません。

  最大相電流ピーク値は、1.5A 以下に制御されています。

6.3 ブレーキ

図 17. 300ms 以内に 3500rpm から 0rpm まで減速した場合のモータ相電流



- 緑の線がモータ目標スピードを示します。
- 青の線がエンコーダ信号から見積もったモータスピードを表します。

この写真は 3500rpm から 0rpm までのモータブレーキの概要を示し、300ms 以内のある位置で停止しています。

7 付加情報

CYPRESS 製品に関する詳細情報は、以下のウェブサイトをご覧ください。

日本語版アドレス:

http://japan.cypress.com/

8 改訂履歴

文書名: AN209182 - PMSM サーボモータスピード制御

文書番号: 002-04467

版	ECN 番号	変更者	発行日	変更内容
**	-	NNAK	10/11/2015	新規作成 アプリケーションノート AN709-00012-1v0-J をドキュメントコード 002-04467 に登録しました。
*A	5640283	NNAK	02/23/2017	最新のテンプレートへ更新しました。
*B	5899077	YSAT	10/03/2017	Cypress の新ロゴを適用。

セールス, ソリューションおよび法律情報

ワールドワイドな販売と設計サポート

サイプレスは、事業所、ソリューション センター、メーカー代理店、および販売代理店の世界的なネットワークを保持しています。お客様の最寄りのオフィスについては、サイプレスのロケーション ページをご覧ください。

製品

ARM® Cortex® Microcontrollers	cypress.com/arm
車載用	cypress.com/automotive
クロック&バッファ	cypress.com/clocks
インターフェース	cypress.com/interface
IoT (モノのインターネット)	cypress.com/iot
メモリ	cypress.com/memory
マイクロコントローラ	cypress.com/mcu
PSoC	cypress.com/psoc
電源用 IC	cypress.com/pmic
タッチ センシング	cypress.com/touch
USB コントローラー	cypress.com/usb
ワイヤレス／RF	cypress.com/wireless

PSoC® ソリューション

PSoC 1 | PSoC 3 | PSoC 4 | PSoC 5LP | PSoC 6

サイプレス開発者コミュニティ

フォーラム | WICED IOT Forums | Projects | ビデオ | ブログ | トレーニング | Components

テクニカルサポート

cypress.com/support

All other trademarks or registered trademarks referenced herein are the property of their respective owners.

Cypress Semiconductor
198 Champion Court
San Jose, CA 95134-1709

© Cypress Semiconductor Corporation, 2015-2017. 本書面は、Cypress Semiconductor Corporation 及び Spansion LLC を含むその子会社（以下、「Cypress」という。）に帰属する財産である。本書面（本書面に含まれ又は言及されているあらゆるソフトウェア又はファームウェア（以下、「本ソフトウェア」という。）を含む）は、アメリカ合衆国及び世界のその他の国における知的財産法令及び条約に基づき、Cypress が所有する。Cypress はこれらの法令及び条約に基づく全ての権利を留保し、また、本段落で特に記載されているものを除き、Cypress の特許権、著作権、商標権又はその他の知的財産権のライセンスを一切許諾していない。本ソフトウェアにライセンス契約書が伴っておらず、かつ、あなたが Cypress との間で別途本ソフトウェアの使用方法を定める書面による合意をしていない場合、Cypress は、あなたに対して、（1）本ソフトウェアの著作権に基づき、（a）ソースコード形式で提供されている本ソフトウェアについて、Cypress ハードウェア製品と共に用いるためにのみ、組織内部でのみ、本ソフトウェアの修正及び複製を行うこと、並びに（b）Cypress のハードウェア製品ユニットに用いるためにのみ、（直接又は再販売者及び販売代理店を介して間接のいずれかで）エンドユーザーに対して、バイナリーコード形式で本ソフトウェアを外部に配布すること、並びに（2）本ソフトウェア（Cypress により提供され、修正がなされていないもの）に抵触する Cypress の特許権のクレームに基づき、Cypress ハードウェア製品と共に用いるためにのみ、本ソフトウェアの作成、利用、配布及び輸入を行うことについての非独占的で譲渡不能な一身専属的ライセンス（サブライセンスの権利を除く）を付与する。本ソフトウェアのその他の使用、複製、修正、変換又はコンパイルを禁止する。

適用される法律により許される範囲内で, Cypress は, 本書面又はいかなる本ソフトウェア若しくはこれに伴うハードウェアに関しても, 明示又は黙示をとわず, いかなる保証 (商品性及び特定の目的への適合性の黙示の保証を含むがこれらに限られない) も行わない。適用される法律により許される範囲内で, Cypress は, 別途通知することなく, 本書面を変更する権利を留保する。Cypress は, 本書面に記載のある, いかなる製品若しくは回路の適用又は使用から生じる一切の責任を負わない。本書面で提供されたあらゆる情報 (あらゆるサンプルデザイン情報又はプログラムコードを含む) は, 参照目的のためのみに提供されたものである。この情報で構成するあらゆるアプリケーション及びその結果としてのあらゆる製品の機能性及び安全性を適切に設計, プログラム, かつテストすることは, 本書面のユーザーの責任において行われるものとする。Cypress 製品は, 兵器, 兵器システム, 原子力施設, 生命維持装置若しくは生命維持システム, 蘇生用の設備及び外科的移植を含むその他の医療機器若しくは医療システム, 汚染管理若しくは有害物質管理の運用のために設計され若しくは意図されたシステムの重要な構成部分としての使用, 又は装置若しくはシステムの不具合が人身傷害, 死亡若しくは物的損害を生じさせるようなその他の使用 (以下「本目的外使用」という。) のためには設計, 意図又は承認されていない。重要な構成部分とは, それの不具合が装置若しくはシステムの不具合を生じさせるか又はその安全性若しくは実効性に影響すると合理的に予想できるような装置若しくはシステムのあらゆる構成部分をいう。Cypress 製品のあらゆる本目的外使用から生じ, 若しくは本目的外使用に関連するいかなる請求, 損害又はその他の責任についても, Cypress はその全部又は一部をとわず一切の責任を負わず, かつ Cypress はそれら一切から本書により免除される。Cypress は Cypress 製品の本目的外使用から生じ又は本目的外使用に関連するあらゆる請求, 費用, 損害及びその他の責任 (人身傷害又は死亡に基づく請求を含む) から免責補償される。

Cypress、Cypress のロゴ、Spansion、Spansion のロゴ及びこれらの組み合わせ、WICED、PSoC、CapSense、EZ-USB、F-RAM、及び Traveo は、米国及びその他の国における Cypress の商標又は登録商標である。Cypress の商標のより完全なリストは、cypress.com を参照のこと。その他の名称及びブランドは、それぞれの権利者の財産として権利主張がなされている可能性がある。