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。

AN204346

FM3 MB9B100A/300A/400A/500A Microcontroller PLL（位相同期ループ）制御

このアプリケーションノートでは、モータ制御における位相同期ループ(PLL)の原理, ブロック図, 関数, フロー, パラメータなどについて説明します。

Contents

1 はじめに 1
2 PLL の目的 1
2.1 ベクトル制御 (FOC) 1
2.2 位相同期ループ (PLL) 2
3 PLL の原理 5
4 PLL 予測パラメータの導入 6
4.1 予測回路モジュールの処理手順例 7
5 予測モジュールのフローチャート 9
6 アプリケーション 10
6.1 関数記述 10
7 改訂履歴 11
セールス, ソリューションおよび法律情報 12

1 はじめに

このアプリケーションノートでは、モータ制御における位相同期ループ(PLL)の原理, ブロック図, 関数, フロー, パラメータなどについて説明します。

2 PLL の目的

演算目的としての PLL

モータ制御のアプリケーション設計者にとって、永久磁石同期モータ(PMSM)を使用することは現在の業界におけるトレンドになっています。同じ分野の他のモータと比較して高い電力密度, 高速なダイナミック応答, 高効率が製造コストの低さや磁気特性の改善とあいまって大規模な製品に PMSM の利用が推奨されるようになっています。

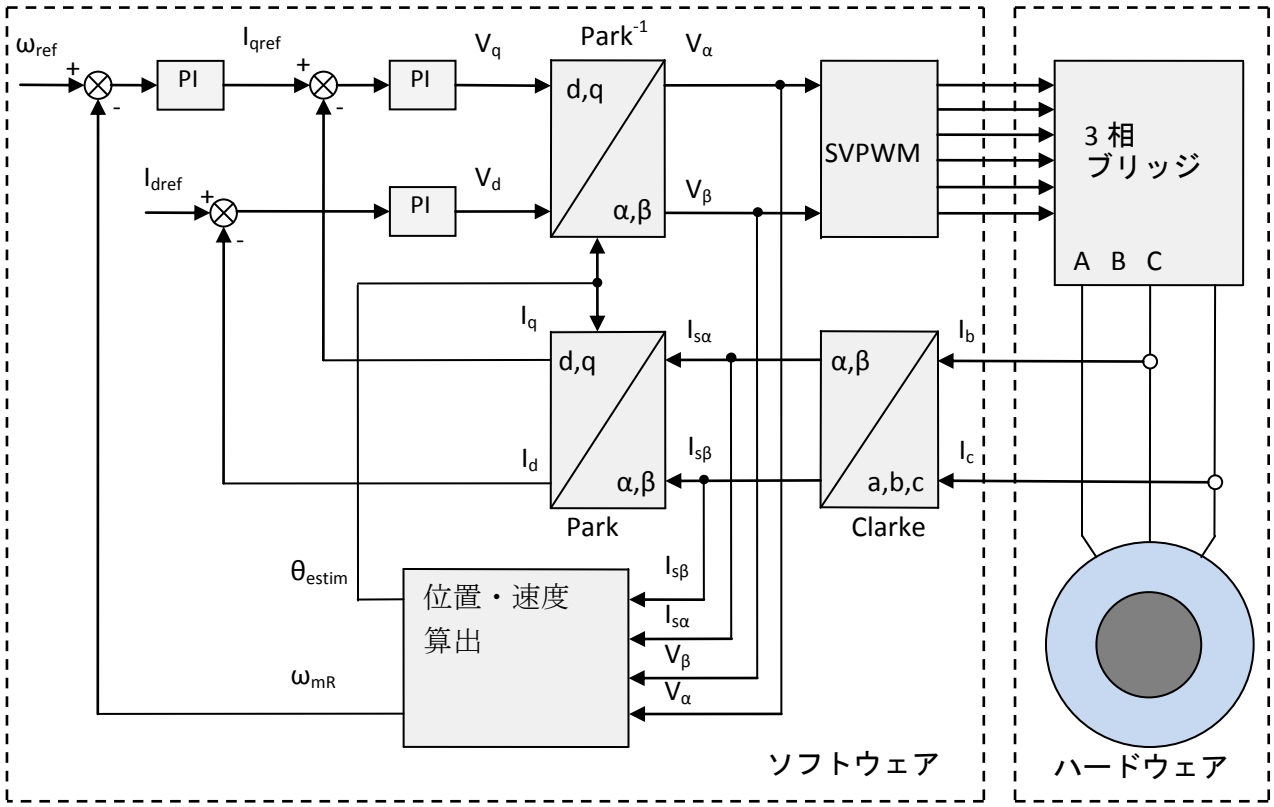
サイプレスでは、PMSM の制御に最適なマイクロコントローラ(MCU)製品を提供しており、あらゆる種類のモータの効率的で柔軟性のある制御を実現することができます。

2.1 ベクトル制御 (FOC)

PMSM では、ロータの界磁速度は、固定子 (電機子) の界磁速度と等価である必要があります(つまり、同期がとれている必要があります)。ロータと固定子の界磁間の同期が失われると、モータが停止します。ベクトル制御(FOC)は磁束の 1 つ(ロータ, 固定子またはエアギャップ)をベースにして他の磁束のリファレンスフレームを生成することで固定子の電流のトルクと磁束生成成分を分離(デカップリング)することを目的としています。分離することによって、複雑な三相モータを、励磁を別構成にした DC モータと同じくらい制御を簡単なものにします。このことは、電機子の電流によってトルクが発生し、励起電流によって磁束が発生することを意味します。本ドキュメント内では、ロータの磁束は固定子およびエアギャップの磁束のリファレンスフレームと見なされます。

FOC の制御方式を図 1 に示します。(この方式は弊社内で実装、テストされており、新たなハードウェアを追加することなく、様々な制御技術により PMSM モータを駆動することができると考えています。)

図 1. センサレス PMSM モータの FOC ブロック図



2.2 位相同期ループ (PLL)

PMSM における FOC の特異性は固定子の d 軸電流の基準である I_{dref}(d 軸の電機子応答磁束に相当)がゼロに設定されるという点です。ロータの磁石は ACIM(AC 誘導モータ)とは違ってロータ磁束 Ψ_{PM} を生成し、磁気電流の固定基準値 I_{dref} を必要とするため、ロータ磁束を生成します。

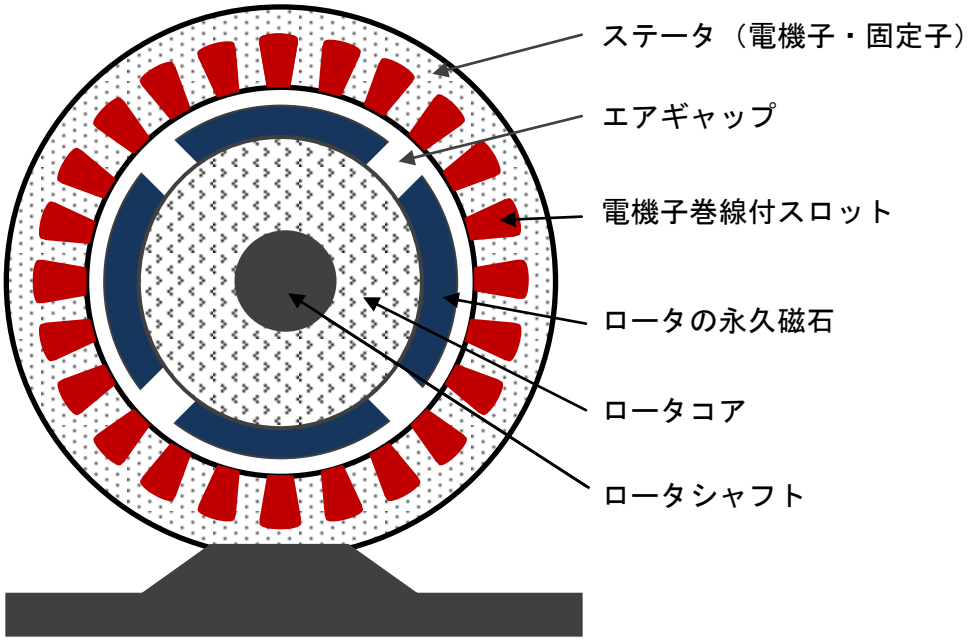
エアギャップ磁束は、ロータの磁束の総和と等価になります。この磁束は永久磁石と固定子電流によって生成される電機子応答磁束によって生じます。FOC の固定トルクモードでは、d 軸のエアギャップ磁束単独で Ψ_{PM} に等しく、d 軸の電機子応答磁束はゼロになります。

逆に固定電力動作時は、固定子電流 I_d の磁束生成成分を使用してエアギャップの磁場を弱め、より高速な速度を実現します。

位置センサや速度センサを必要としないセンサレス制御では、温度、電磁ノイズなどの外乱要因を除去できる堅牢な速度予測回路の装備が重要になります。位置センサのような可動部品が使用できない、あるいはモータの動作環境が電気成分を許容できない環境など、通常は、その用途が非常にコストの影響を受けやすいところでセンサレス制御が必須となります。しかし、特に低速動作の用途によっては高精度制御への要求がさして重要ではないこともあります。

位置と速度の予測は、モータの数学モデルに基づきます。したがって、モデルが実際のハードウェアに近いほど、予測回路は理想的に機能します。PMSM の数学モデルはその構成によって異なり、主に表面実装タイプと永久磁石内蔵タイプに分かれます。いずれのタイプもその用途によって利点と弱点があります。図 2 に示した制御方式は、表面実装された永久磁石の同期モータの周辺に取り付けるもので、PMSM の他のタイプのものに比べてトルクリップルが低く、低価格であるというメリットがあります。モータタイプのエアギャップ磁束はスムーズなため、固定子のインダクタンス値は $L_d = L_q$ (非突極 PMSM) であり、逆起電力(BEMF)は正弦波です。

図 2. 表面実装 PM PMSM 横断面



PMSM について、エアギャップが大きいということは (固定子の歯とロータコア間に置かれた表面実装磁石を含めて)、サイズと公称電力値が同じ他のタイプのモータと比較してインダクタンスが小さいことを示します。これらのモータの特性により、速度および位置予測回路に使用する数学モデルをより簡単にすることができるとともに FOC を効率的に使用することができます。

アンペアあたりの FOC の最大トルクは、電機子によって生成された磁束リンケージの背後に 90°の角度でモータのロータ磁束を常に位置させることで得られます(図 3 を参照)。

図 3. FOC 位相図 (基本速度)

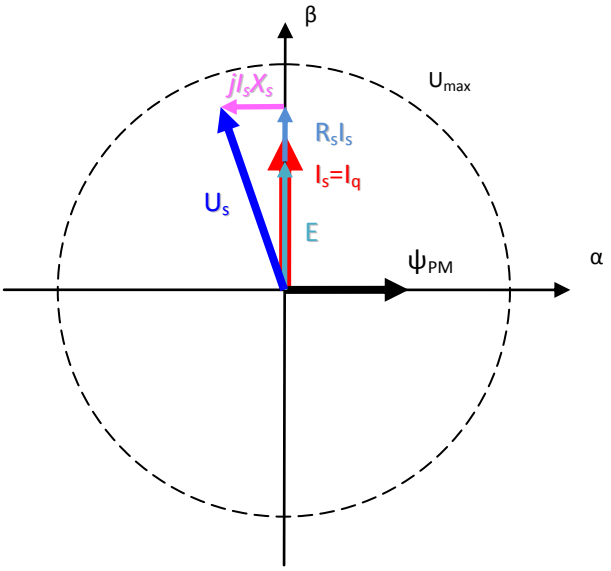


図 2 と図 3 において

jI_sX_s ：ステータインダクタ成分における電圧ドロップ

R_sI_s ：ステータ抵抗成分における電圧ドロップ

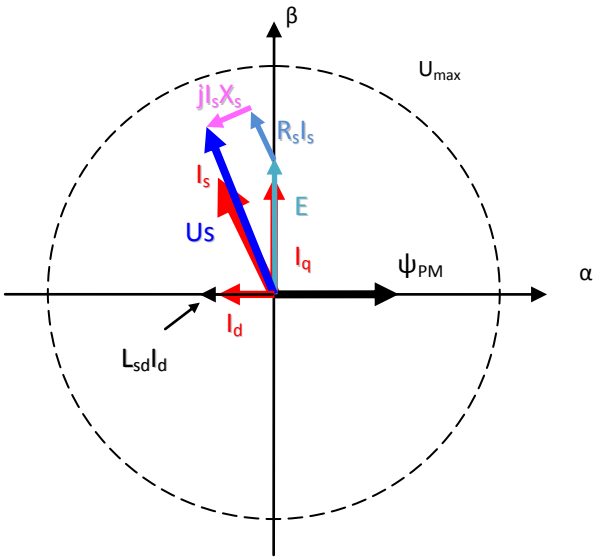
E ：逆起電力

ψ_{PM} ：ロータ永久磁石の磁束成分

U_s ：ステータ端子電圧

FOC の一定電力モードを考慮すると、対象となるモータの磁界を効果的に弱めることはできません。なぜなら大きなエアギャップ空間のために、ロータの永久磁石の磁束を乱す電機子応答磁束が弱いためです。したがって、最大速度でもテスト対象のモータの基本速度の倍を達成することはできません。図 4 は磁場弱小モードの一定電力における位相方向を示したものです。

図 4. FOC 位相図 (高速 - FW)



3 PLL の原理

PLL タイプ予測回路のアルゴリズム

予測回路は PLL 構成になっています。その動作原理は、「逆起電力(BEMF)の d 成分は定常状態の機能モードではゼロに等しくなければならない」という事実に基づいています。予測回路のブロック図を図 5 に示します。

図 5. PLL 予測回路のブロック図

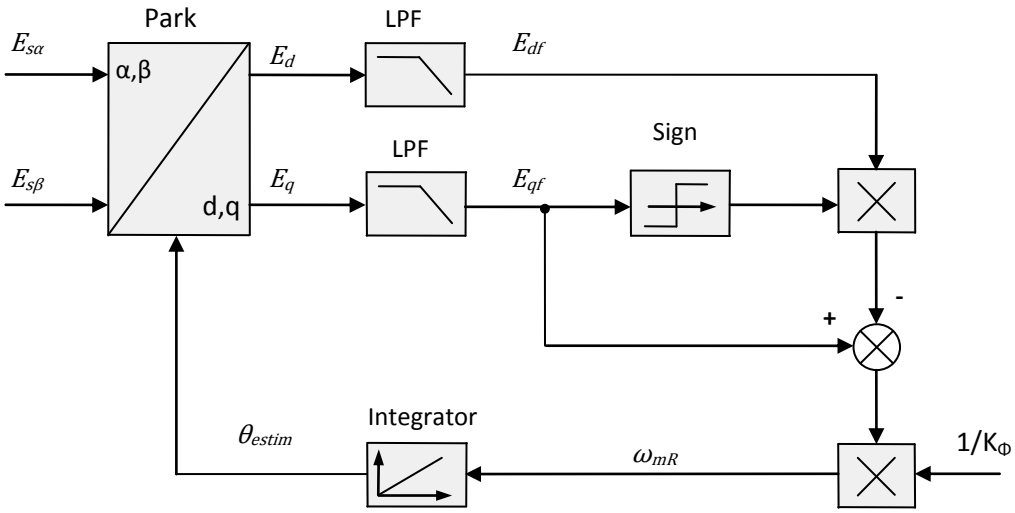


図 5 に示した閉ループから始めて、ロータの予測速度 (ω Restim) を統合して、式 1 に示すような予測角度が得られます。

式 1:

$$\theta_{estim} = \int \omega_{mR}\, dt \qquad (1)$$

予測速度 ω Restim は、式 2 に示すように BEMF 値の q 成分を電圧定数 KΦ で割ることによって得られます。

式 2:

$$\omega_{mR} = \frac{1}{K_\Phi}\left(E_{qf} - \text{sign}\left(E_{qf}\right) \cdot E_{df}\right) \qquad (2)$$

式 2 に示すような初期の予測の前提(BEMF の d 軸の値は定常状態でゼロ)を考慮して、符号によって d 軸の BEMF 値 E_{df} を使用して BEMF の q 軸の値 E_{qf} が補正されます。BEMF d-q 成分の値は式 3 に示すような Park 変換による計算後, 一次フィルタに掛けられます。

式 3:

$$\begin{cases} E_d = E_\alpha \cos(\theta_{estim}) + E_\beta \sin(\theta_{estim}) \\ E_q = E_\beta \cos(\theta_{estim}) - E_\alpha \sin(\theta_{estim}) \end{cases} \qquad (3)$$

固定された固定子フレームでは、式 4 は固定子回路の式を表します。

式 4:

$$\begin{cases} E_\alpha = V_\alpha - R_s I_\alpha - L_s \dfrac{dI_\alpha}{dt} \\ E_\beta = V_\beta - R_s I_\beta - L_s \dfrac{dI_\beta}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式 4 では、α – β を含む項はクラーク変換で得られた三相システムの測定値から得られます。LS と RS は、Y (スター)接続固定子の相を考慮した位相ごとの固定子のインダクタンスと抵抗をそれぞれ示しています。モータが Δ(デルタ)接続されている場合には、等価 Y 接続位相抵抗とインダクタンスを計算し、上記の式を使用する必要があります。

4 PLL 予測パラメータの導入

予測モジュールはソフトウェアの中で最も重要なモジュールで、ロータの角速度 ωmR と位置 θesti を予測します。

図 6. 速度と角度の予測回路のブロック図

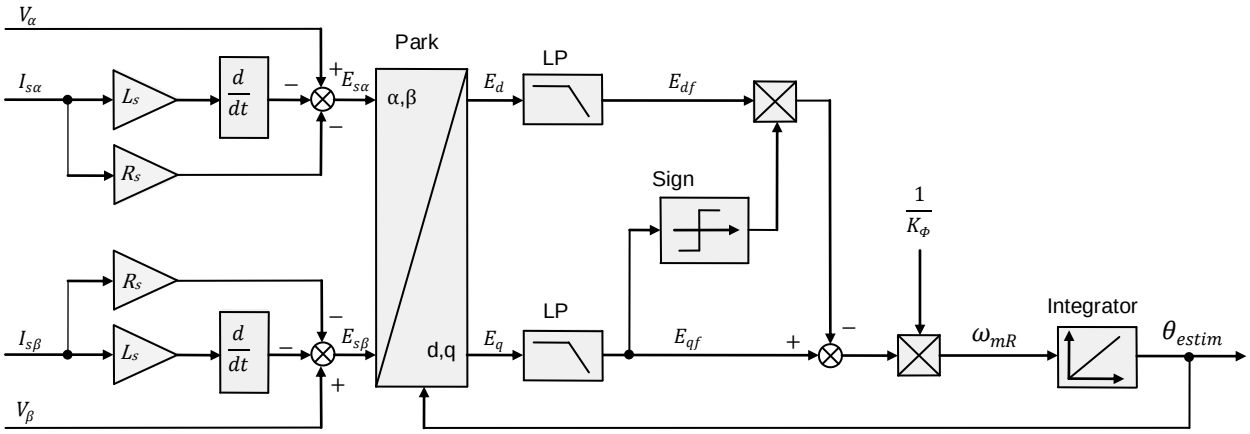
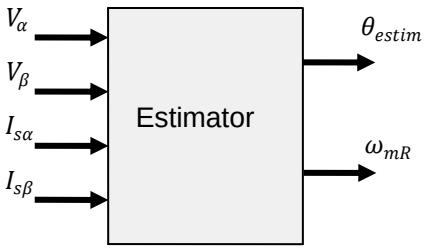


図 7.予測回路



予測回路ブロックの入力変数:

電流信号の α 成分と β 成分: クラーク変換で得られた Isα, Isβ

固定子電圧信号の α 成分と β 成分: SVM モジュールの Vα, Vβ

予測回路ブロックの出力変数:

角速度および平均角速度 ωmR, ωmR_avr が PI レギュレータに出力され、速度 PI ループを構成。

予測位置 θesti が Park に出力され、その後 Park 逆変換される。

4.1 予測回路モジュールの処理手順例

下記に、予測回路モジュール式の例について説明します。

- **ステップ1**

BEMF 電圧は式 5, 6 で計算されます。

$$E_{s\alpha} = 1.5\left(-I_{s\alpha}R_s - L_s\frac{dI_{s\alpha}}{dt} + V_{\alpha}^{n-1}\right) \quad (5)$$

$$E_{s\beta} = 1.5\left(-I_{s\beta}R_s - L_s\frac{dI_{s\beta}}{dt} + V_{\beta}^{n-1}\right) \quad (6)$$

ここで、

Esα は BEMF の α 成分, Esβ は BEMF の β 成分

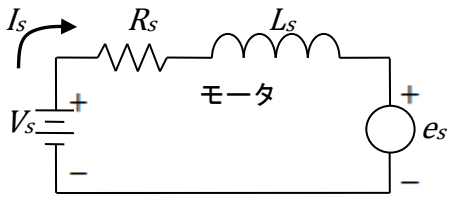
Vαn-1 は前のサイクルの固定子電圧の α 成分

Vβn-1 は前のサイクルの固定子電圧の β 成分

RL は巻線抵抗

Ls は巻線インダクタンス

図 8.



- **ステップ 2**

予測されたロータ角度の sin および cos 値を計算します。

cos(θesti) と sin(θesti) を使用して、予測角度を sin 値と cos 値で示します。

- **ステップ 3**

BEMF の計算された α-β 成分が式 7, 8 に示すように d-q 座標値に変換されます。

変換角度は、予測磁束角度 θesti です。

$$E_d = E_{s\alpha}\cos(\theta_{estim}) + E_{s\beta}\sin(\theta_{estim}) \quad (7)$$

$$E_q = E_{s\beta}\cos(\theta_{estim}) - E_{s\alpha}\sin(\theta_{estim}) \quad (8)$$

- **ステップ 4**

BEMF の d-q 成分である Ed, Eq にフィルタを掛け、ノイズを低減します。Eds, Eqs は、LPF 関数によってフィルタを掛けられた BEMF の d-q 成分です。

- **ステップ 5**

予測角速度が以下の式で示すように q 軸の BEMF の符号によって、加算、減算されて d 軸で BEMF によって計算されます。

$$\begin{cases} \omega_{mR} = \dfrac{INVFAYM\left(E_q - sign\left(E_q\right) \cdot E_d\right)}{2^n} \\ INVFAYM = \dfrac{1}{induct\ voltage\ constant} \end{cases} \quad (9)$$

予測回路の安定性と収束度を上げるために予測された角速度を制限する必要があります。その一方で、ωmR > ωmR の最大値の場合、ωmR の最大値に制限する必要があります。

- **ステップ 6**

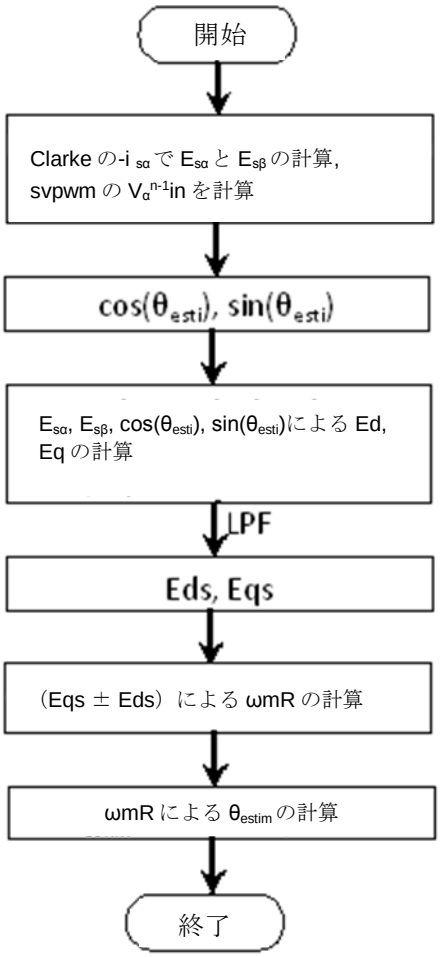
ロータ位置と角速度には積分の関係があるため、予測されたロータ位置 θestim は、角速度を積分することによって計算されます。

$$\theta_{estim} = \frac{(\theta_{estim} + \omega_{mR} \cdot DELTA_T)}{2^n} \quad (10)$$

ただし、θ は Qn フォーマットになります。

5 予測モジュールのフローチャート

図 9.



6 アプリケーション

PLL アプリケーションのサンプルプログラム例を示します。

6.1 関数記述

関数名: RunMotorCtrlAlgo

C ファイル名: DrvMotor_MCL.C, DrvMotor_MCL.H

関数インタフェース: void RunMotorCtrlAlgo(INT8S WhichMFT)

表 1.

項目	名称	説明	フォーマット
入力	WhichMFT	使用する MFT のチャネル (MFT0, MFT1) を選択します。	INT8S

このモジュールのコード例を以下に示します。

```
void  example_ RunMotorCtrlAlgo ()
{
WhichMFT=0;
RunMotorCtrlAlgo(WhichMFT);
}
```

7 改訂履歴

ドキュメント名 : AN204346 - FM3 MB9B100A/300A/400A/500A Microcontroller PLL (位相同期ループ) 制御

ドキュメント番号 : 002-05994

Revision	ECN	変更者	発行日	変更内容
**	–	NNAK	12/15/2011	サイプレスとしてスパンションアプリケーションノート AN706-00035-1v0-J をドキュメントコード 002-05994 に登録しました。 本版の内容およびフォーマットに変更はありません。
*A	5639311	NNAK	02/22/2017	Cypress テンプレート形式に更新されました。 これは英語版 002-04346 Rev.*A を翻訳した日本語版です。
*B	5945391	YSAT	10/26/2017	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	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, 2011-2017. 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。