

AVR[®]マイクロ コントローラ用感知器なしBLDC電動機制御

序説

著者: Alexandru Zîrneă, Leona Pop, Microchip Technology Inc.

この応用記述はAVR[®] DAとAVR DB系からのAVR128DA48とAVR128DB48のマイクロ コントローラに基づいてプラグイン単位部(PIM:Plug-in Module)を使う感知器なしブラシなし直流(BLDC:Brushless Direct Current)電動機制御法を記述します。

この文書の最初の部分はソフトウェア実装が由来を求められる電動機制御原理に集中します。これは感知器でと感知器なしでの制御法、台形整流(転流)についての詳細、電動機駆動方法について他の重要な情報を記述します。

次の部分はシステムのソフトウェアとハードウェアの実装に専念されます。

例応用dsPICDEM[™] MCLV-2開発基板(電動機制御低電圧(MCLV:Motor Control Low-Voltage)) (MCLV-2)に接続されたAVR128DA48またはAVR128DB48に基づくPIMを使います。MCLV-2基板は回転速度を調節するための可変抵抗器を提供すると同時にPIMで入力保護と逆起電力(BEMF:Back Electromotive Force)の回路があります。

システムは回生制動(ブレーキ)の能力があり、これは使った駆動法に元々備わっています。

電動機に対する駆動波形はマイクロ コントローラの周辺機能のハードウェア能力を使い、コアから独立して生成されます。

加えて、応用は立往生検出、誤入力検出、両方向での過電流保護のようないくつかの保護機構を使います。

システムはファームウェアの適正な調整で広範囲のBLDC電動機を駆動することができます。各種電動機形式に必要なとされるパラメータ調整に対する指針は文書の最後に概説されます。

BLDC電動機はコードレス電力ツール、コンピュータ、ハードドライブ(ディスク)、マルチメディア装置、小さな電子機器の冷却送風機、電気自動車のような広範囲の応用で使われ、未来に対する電気の成長市場です。伝統的にこの装置を作るのに16ビット以上のマイクロ コントローラが使われていたのに、提示される解決策は8ビット マイクロ コントローラを使うことによって費用効率の良い電動機駆動部を作成します。



GitHubで電動機制御PIMコード*を見てください。
貯蔵庫を閲覧するにはクリックしてください。

本書は一般の方々の便宜のため有志により作成されたもので、Microchip社とは無関係であることを御承知ください。しおりの[はじめに]での内容にご注意ください。

目次

序説	1
1. 概要	3
2. 関連デバイス	4
3. 電動機制御原理	5
4. ファームウェア実装	10
5. プラグイン単位部(PIM)基板説明	17
6. 調整	22
7. 結び	24
8. 参考文献	24
9. 改訂履歴	24
Microchipウェブ サイト	25
製品変更通知サービス	25
お客様支援	25
Microchipデバイスコード保護機能	25
法的通知	25
商標	26
品質管理システム	26
世界的な販売とサービス	27

1. 概要

この応用記述はBLDC電動機を駆動するのに必要とされる電動機制御原理を提示し、感知器有りと感知器なし間での電動機制御の比較、電力断の代表的な実装、変調技法だけでなく独自PIMの詳細な記述も含まれます。

更に、この文書はこの例の焦点である双極切り替えの詳細な紹介を網羅します。

回転子の位置を得るため、電動機の仮想中立点から成る可変電圧参照基準とで比較器を使う0交差点検出法が網羅されます。

電動機は整列ルーチン後の初期位置で開始します。これは始動に於いて電動機が生成された開路波形に追従するように行われます。

コンパイル時、電動機が動かなければならない動作形態の開路または閉路を選ぶことができます。

MCLV-2基板上の可変抵抗器はADCによって読まれる値を提供し、波形計時器用のデューティ参照基準を計算するのに使われ、この読み取り値は電流と共にソフトウェアの電動機論理回路駆動と非同期に行われます。この部分が主繰り返しで走行する一方で、電動機制御は可能な最良の応答時間を得るために割り込みで走行します。

この文書の終わりで、望む結果を得るためにファームウェアのパラメータを調整するための簡単な紹介を見つけることができます。

この応用例は以下の周辺機能を使います。

- アナログ比較器 (AC)
- A/D変換器 (ADC)
- I/Oピン制御器 (PORT)
- タイマ/カウンタA型 (TCA)
- タイマ/カウンタB型 (TCB)
- タイマ/カウンタD型 (TCD)
- 構成設定可能な注文論理回路 (CCL)
- 基準電圧 (VREF)
- 万能同期非同期送受信器 (USART)

事前要件

1. ソフトウェア:

- (DFP 1.7.85またはより新しい)AVR Dxデバイス系一括を持つMicrochip Studio 7統合開発環境(IDE)

2. ハードウェア:

- AVR128DA48電動機制御PIMまたは内部演算増幅器構成設定基板を持つAVR128DB48電動機制御PIM
- [dsPICDEM™ MCLV-2開発基板\(電動機制御低電圧\)](#)
- [AC300020 - 24V 3相ブラシレスDC電動機](#)
- [AC002013 - 24V電源](#)
- [MPLAB® PICkit™ 4インサーキット デバッグ](#)

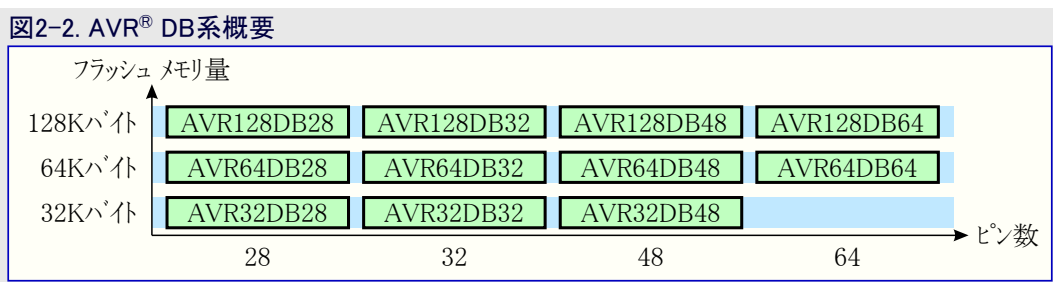
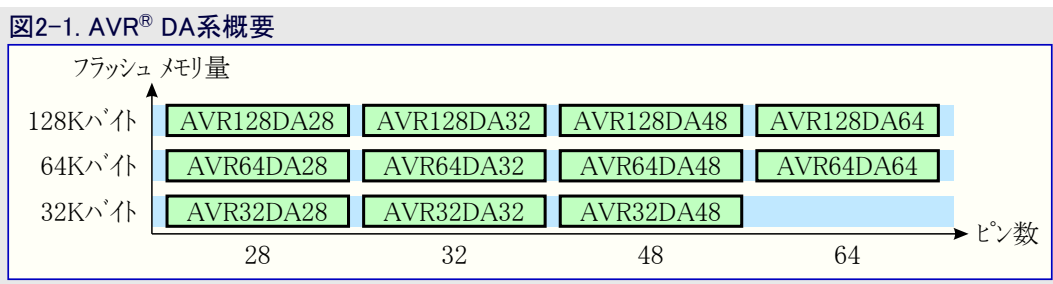
MCLV-2基板は感知器有りまたは感知器なしでの動作でブラシレス電動機または永久磁石同期電動機のどちらかを制御するのを目的とされます。この実演では感知器なし動作でブラシレス電動機を駆動するのにAVR128DA48またはAVR128DB48電動機制御PIMと共に使われます。この基板は3相用駆動部、帰還信号を測定する方法、基板上演算増幅器を提供します。付加的な構成設定基板は内部演算増幅器信号が直接配線されるためAVR128DB48 PIMで使われます。

この実演はプログラミング インターフェースと電動機の動作パラメータについての情報を受け取るため、シリアル インターフェースのようなMCLV-2基板のいくつかの他の機能を使います。加えて、どのPWM出力が活性かを示すため、電動機の方向を設定してそれを開始及び停止するため、そして電動機の変速するためのユーザーインターフェースを提供する基板上のLED、釦、可変抵抗器があります。

2. 関連デバイス

本章はこの文書に関連するデバイスを一覧にします。下図はピン数変種とメモリ量で並べて各種系列デバイスを示します。

- これらのデバイスがピン互換で同じまたはより多くの機能を提供するため、垂直上方移植はコード変更なしで可能です。
- 左への水平方向移植はピン数、従って利用可能な機能を減らします。
- 異なるフラッシュメモリ量を持つデバイスは一般的に異なるSRAMとEEPROMの量を持ちます。



3. 電動機制御原理

本章は電動機制御の概念とそれらがソフトウェアとハードウェアの実装でどう適用されるかを説明します。

3.1. 感知器有り 対 感知器なしの制御

BLDC電動機は同期且つ小型で、高効率を提供しどんな保守に対する必要性もなくします。これらはブラシ付きDC電動機に対する大きな優位性を持ち、非常に厳しい規格を必要とするお客様や工業応用に適しています。

ブラシ付きDC電動機は機械的に整流(転流)されます。これらは特定の回転子位置に従って巻線に電圧を供給するブラシと整流子を持ちます。

ブラシ付きDC電動機と異なり、BLDC電送機の整流(転流)は回転子の位置に応じて行われ、これは既知でなければなりません。

回転子の位置を決めるため、感知器有りまたは感知器なしのどちらかの算法を使うことができます。

3.1.1. 感知器有り制御

1つの方法は固定子の外側でそれによって回転子の磁石に反応して位置を決めるのに使うことができる信号を与える感知器を使うことです。一般的に、ホール効果感知器は2つの遷移間で60°の違いを与えます。

感知器使用の利点は各ホール効果感知器の状態を知ることによって、システムの通電に於いて例え速度が0でも回転子の位置が知れることです。

感知器使用の主な欠点はそれらが電動機に費用と複雑さを追加すると同時に補助的な電力も必要です。

3.1.2. 感知器なし制御

別の方法は制御基板で少しの受動部品だけを必要とする感知器なし制御を使うことです。

この方法は逆起電力(BEMF: Back ElectroMotive Force)と呼ばれる、回転子内の磁石の移動によって誘発される浮いている相での電圧を感知することによって動きます。BEMFは回転子の現在位置についてのデータをマイクロコントローラに与えます。

1つの巻線で誘発された電圧が回転子の速度に比例するため、非常に低い速度で、BEMFの振幅は非常に小さくて雑音が多く、濾波器に対して難しくなります。そのため、回転子がマイクロコントローラによって生成された磁場に非同期で従う開路開始手順があります。速度はBEMFが検出可能な振幅を持つまで継続的に増します。

感知器なし制御の利点はどの感知器付き電動機でも感知器なし動作で駆動することができ、それが可能な場合にフェイルセーフ(安全)制御法として使うことができます。系が電動機の包括的なBEMF以外に外部入力に依存しないため、より信頼性もあります。

ホール効果感知器がどんな雑音もなしに論理信号を提供する感知器付き制御と異なり、感知器なし制御は電動機構造、電源雑音と他の要素のため、信号の濾波と調整が必要です。

BEMF濾波のため、電動機速度の突然の変更は正確に検出することができず、系を固定化外にするかもしれません。感知器有り制御は電動機動作状況に関わらずホール感知器が信号を提供するため、この問題に悩まされません。

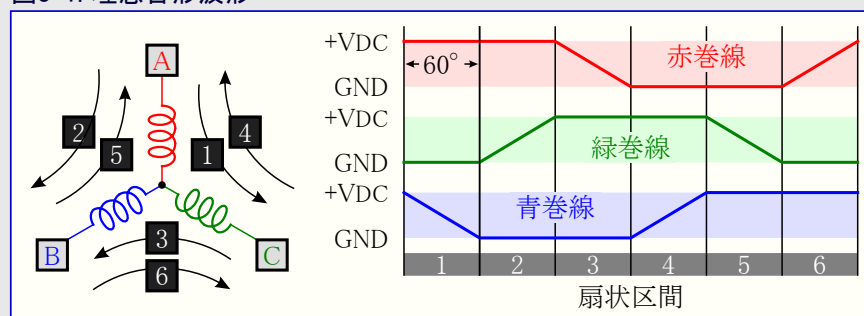
3.2. 6段階(台形)整流

台形制御は2つの相が駆動され、3つ目の相は浮きそのままにされる3相(この場合、A、B、C)から成り、従って移動している回転子によって生成されるBEMFの0交差を検出する能力を与えます。

各段階または扇状(区間)は合計360°または1つの完全な電氣的回転からの60°を表します。

段階整流(転流)は次のように行われます。

図3-1. 理想台形波形



段階1:

- ・ 赤巻線は正に駆動されます。
- ・ 緑巻線は負に駆動されます。
- ・ 青巻線は駆動されません。

段階2:

- ・ 赤巻線は正に駆動されます。
- ・ 青巻線は負に駆動されます。
- ・ 緑巻線は駆動されません。

段階3:

- ・ 緑巻線は正に駆動されます。
- ・ 青巻線は負に駆動されます。
- ・ 赤巻線は駆動されません。

段階4:

- ・ 緑巻線は正に駆動されます。
- ・ 赤巻線は負に駆動されます。
- ・ 青巻線は駆動されません。

段階5:

- ・ 青巻線は正に駆動されます。
- ・ 赤巻線は負に駆動されます。
- ・ 緑巻線は駆動されません。

段階6:

- ・ 青巻線は正に駆動されます。
- ・ 緑巻線は負に駆動されます。
- ・ 赤巻線は駆動されません。

定速に於いてまたは小さな速度変化に対して2つの整流間の周期は同じです。これは閉路で電動機を制御するための推定です。

この実装はそれが小さなメモリ資源と処理電力しか必要としないので、その簡単さと8ビットマイクロコントローラでの非常に容易な実装のため、台形整流(転流)を使います。

3.3. 電力段

電力段は各相を供給電圧または接地のどちらかに繋げることができる3つの半ブリッジから成ります。切り替え素子は一般的に低電圧応用に対してMOSFET、または高電圧応用に対してIGBTです。

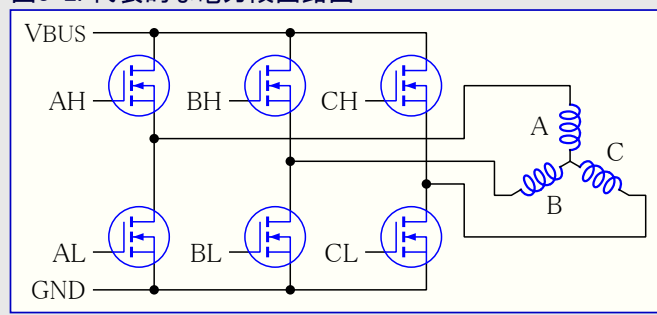
AH、BH、CHはマイクロコントローラからのHigh側指令信号を表す一方で、AL、BL、CLはLow側信号を表します。

電力トランジスタに加えて、良好な上昇と下降の時間を保証してHigh側とLow側のトランジスタに対して必要とされるゲート電圧を提供するのにMOSFET/IGBT駆動部が使われます。

High側とLow側の指令信号間に沈黙時間を追加することによって突き抜けを避けるために組み合わせ論理回路が使われます。

この沈黙時間は同じ分岐上のMOSFETまたはIGBTが補完的にOFFにされ同時に電流を伝えないことを保証します。

図3-2. 代表的な電力段回路図



3.4. 変調技法

BLDC電動機を制御するため、電動機の相に印加される電圧水準は調整されることが必要です。これはブラシ付きDC電動機と同じように行うことができ、それはパルス幅変調(PWM:Pulse-Width Modulation)の手助けで電圧を変調することです。従って、電動機速度はPWM信号のデューティサイクルに直接比例します。

以降の項はそれらの利点と欠点と共に2つの切り替え方法を提示します。

3.4.1. 単極切り替え

単極切り替えは1つの台形段階中で電力供給されるのに2つのトランジスタを必要とします。

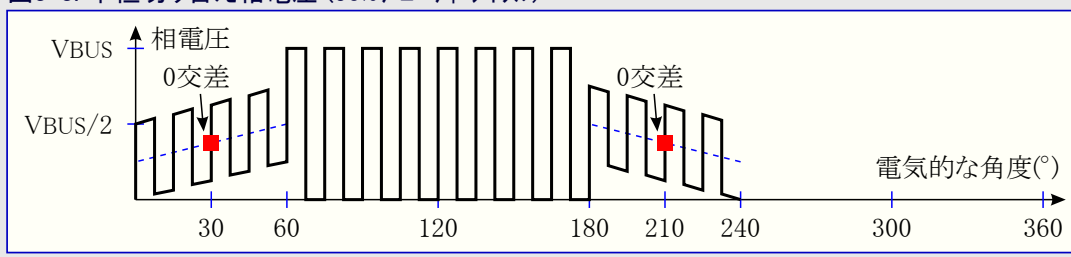
Low側トランジスタは何時も伝導している一方で、上(High)側はPWM信号を受け取っています。殆どの応用で、High側トランジスタの指令はMOSFET駆動部によって処理されます。MOSFET駆動部はLow側が伝導している時に充電するブートストラップコンデンサを持ちます。使った方法がLow側でPWMを印加する場合、ブートストラップコンデンサはデューティサイクルに応じて充電され、低い%のデューティサイクルで低い充電になり、これはトランジスタのRDS(ON)の増加に帰着して全体効率の低下、または駆動部ICチップの低電圧保護になるでしょう。

感知器なし制御で、この方法は次のようないくつかの問題を引き起こします。

- BEMFが見られる間、浮いている相でPWMが誘発されるので、全ての巻き線間での電磁結合のため、波形が細切れにされます。従って、特定の時間でBEMFを'採取'するのに同期法が必要とされます。この採取時間はBEMFが安定で変化しないHighパルスの中間でが理想的です。
- 波形に重なるなどの雑音も濾波するのが難しく、不適切な時に0交差を起動し、これは効率を低下し、音響的と電氣的の両雑音を増します。この方法で、伝統的なRC濾波器は大きな値を必要とし、高速に於いて大きな遅延量をもたらすため、低速で非効率であることが分かります。

単極切り替えで使う代表的な波形は図3-3.で見ることができます。

図3-3. 単極切り替え相電圧 (50%デューティサイクル)



3.4.2. 双極切り替え

単極切り替えと異なり、双極切り替えは1つの台形段階中で電力供給されるのに4つのトランジスタを必要とします。

単極切り替えと対照的にこの場合、電力供給されない他の2つのトランジスタは各段階に対してそれらの特性を補完します。

この動きは以下の状況で説明されます。

特定状態はAH-BLで、これはA相がHighに接続され、B相がLowに接続されることを意味します。これはA相半ブリッジのHigh側トランジスタとB相のLow側トランジスタの電力供給によって行われます(図3-4.)。

AH-BLの補完状態はAL-BHで、電流はどのように流れます。以降の図3-5.をご覧ください。

図3-4. AH-BL状態中の電流の流れ

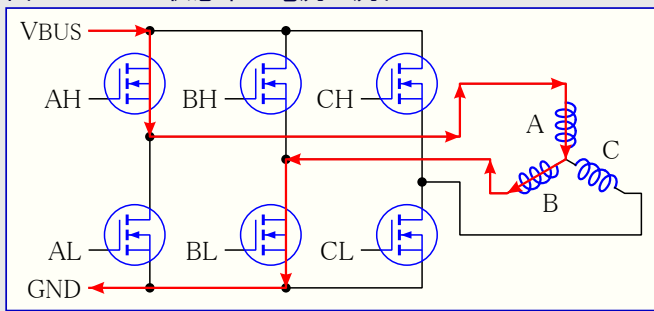
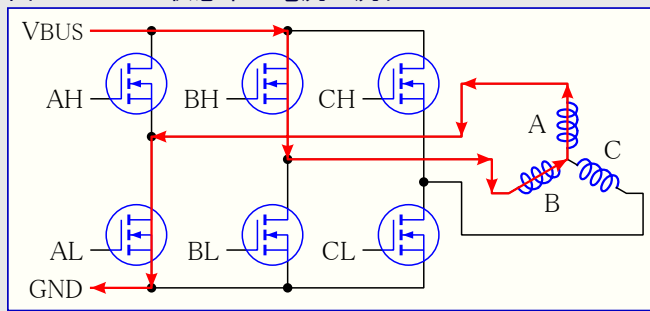


図3-5. AL-BH状態中の電流の流れ



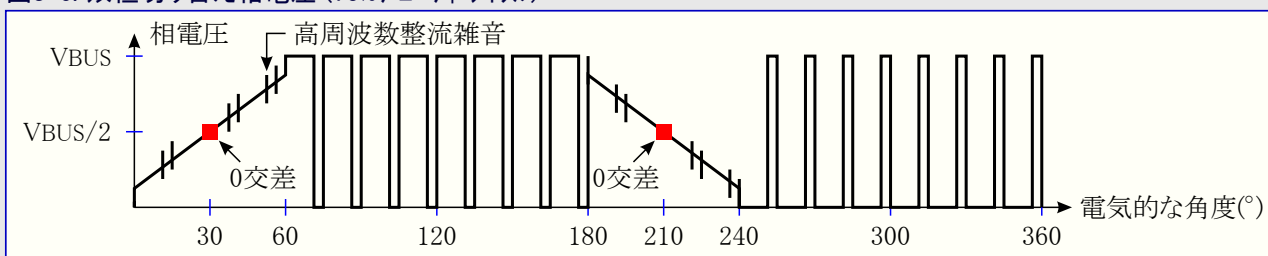
単極駆動に対する0%デューティサイクルでの速度0を考慮すると、この場合、速度0は補完状態時間が特定状態に等しい50%デューティサイクルです。

この方法は浮いている相で誘発される全ての電圧が補完状態によって打ち消され、従って高周波数スパイクだけを含む波形を得て、これは非常に小さな時定数を持つRC濾波器を使って濾波することができるため、非常に綺麗なBEMFの利点を持ちます。

この方法の主な欠点はより多くの電磁的及び音響的な雑音を放出し、切り替えのために別のトランジスタ対が必要とされるため、系全体の損失を増すことです。

1つの相での電圧は図3-6.で見ることができます。

図3-6. 双極切り替え相電圧 (75%デューティサイクル)



高周波数スパイクは特定状態と補完状態の間の遷移で現れます。これらはスパイクの振幅が整流区間の近くでより高くなる低インダクタンス電動機で観察することができます。

図3-7. 低インダクタンス電動機でのBEMF雑音

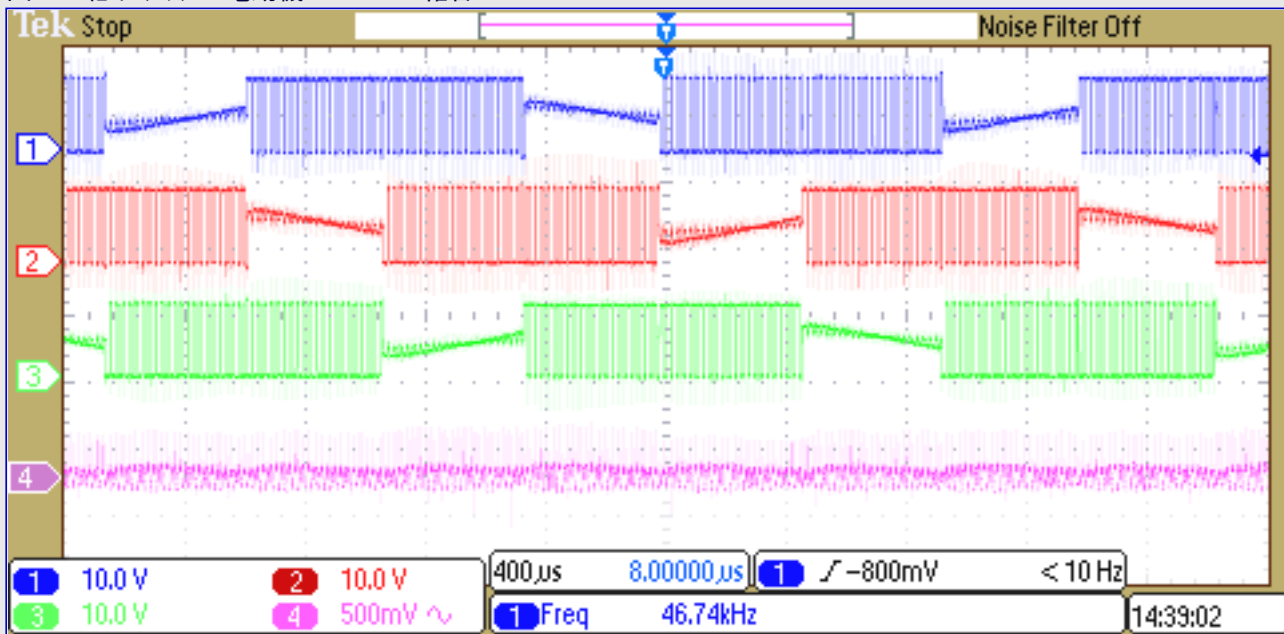
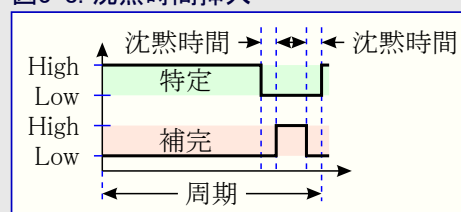


図3-7.に於いて、最初の3つの波形は電動機の3つの相に対するPWM信号を表す一方で、4つ目の波形はトランジスタを通して感知された電流を表します。

突き抜けを避けるため、駆動部の指令信号間に沈黙時間が追加されます。

図3-8. 沈黙時間挿入



概ね42ns(PWM計時器の1クロック周期)の沈黙時間が追加され、結果は図3-9.で見ることができます。けれども、MOSFET/IGBTが高いゲート容量を持つ場合により大きな沈黙時間を持つことが推奨されます。

図3-9. 電動機波形接写

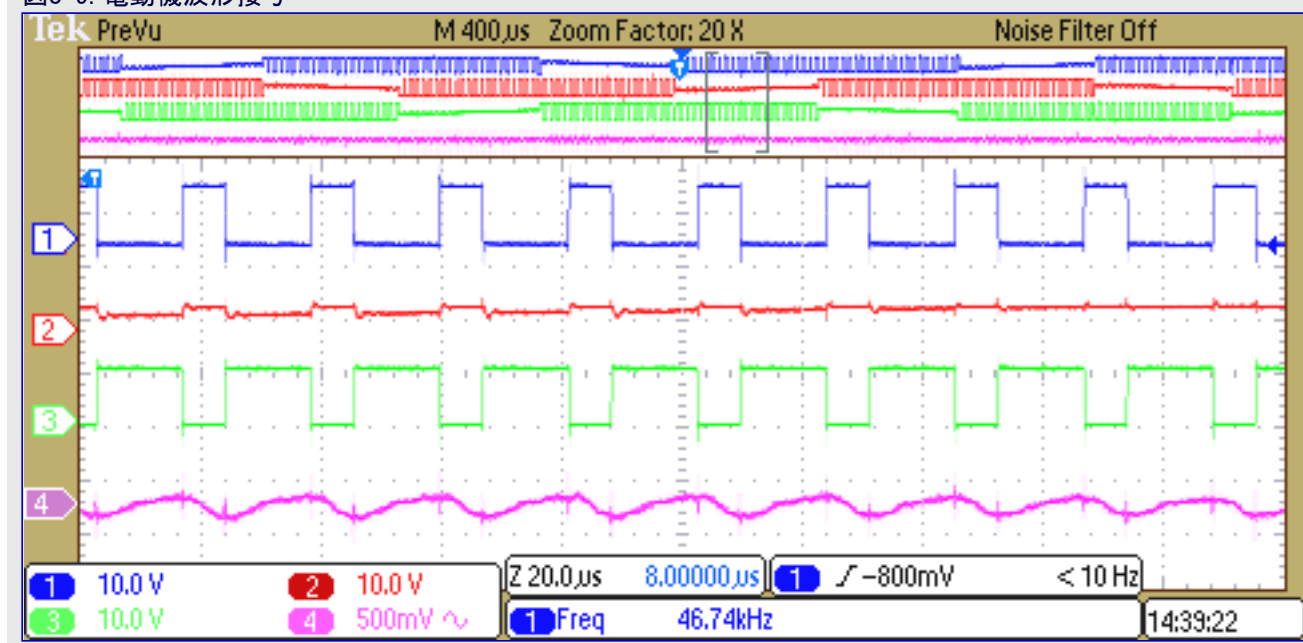


図3-9.に於いて、最初の3つの波形は3つの相に対するPWM信号を表す一方で、4つ目の波形はトランジスタを通して感知された電流を表します。電流波形の小さなスパイクはトランジスタ切り替えに対応し、小さな突き抜け量を表します。沈黙時間が追加されなければ、この電流がかなり上昇してトランジスタが温かくなって燃え上がるでしょう。

切り替え雑音

単極切り替え同様、双極切り替えは特有の問題に悩まされます。整流(転流)中、電動機がそれに印加される或る量の負荷を持つと、0交差の検出に影響を及ぼす減磁結果があり、潜在的に誤った入力を与え、これは次に電動機が同期しなくなります。

これは減磁結果がほぼ電氣的な30°になり得るため、特に困難になり得、これは次に0交差を検出できる領域が制限され、潜在的にそれを抑圧します。

回生制動(ブレーキ)

ブラシレス電動機は4つの異なる領域で動くことができます。これらの領域は'象限'と呼ばれ、図3-10.で記述されます。

この応用記述については I と II の象限番号が対象で、電動機は特定の制御算法の介在なしにどちらか1つで動くことができます。

象限番号 I では電動機がバスから電流を引き出し、自由走行またはそれに印加された負荷を持ちます。測定した回転子の速度は設定速度と同じかそれ以下です。

他の側、象限番号 II では系の慣性または他の外部的な力のため、設定した電動機の速度は設定速度よりも低くなります。

II 現象動作はデューティサイクルに直接関連し、これは下の式で与えられる特定RPMを強いるでしょう。

$$RPM = K_V \times U$$

ここで K_V は電動機のパラメータで、 U は巻線に印加される電圧です。

次の概念、 PRM_{SET} と $RPM_{MEASURED}$ は或る時点で設定したRPMと電動機の現在のRPMについての情報を提供をします。

従って、次のように式でRPMの違いを表すことが必要です。

$$\Delta RPM = PRM_{SET} - RPM_{MEASURED}$$

ΔRPM が0よりも大きい場合、電動機は象限 I で、電源から電流を引き出します。

または、 ΔRPM が0未満の場合、電動機は象限 II で、電流を電源へ押し込みます。

これは電動機の動きの大まかな近似で、摩擦損失や負荷のような変数は考慮していません。

象限 II で、系は昇圧変換器のように動き、生成され得る最大電流は電動機のパラメータだけでなく、先に言及した ΔRPM と電池のESRに依存します。

等価回路は電動機に対して次のように得ることができます。

図3-10. 4象限動作

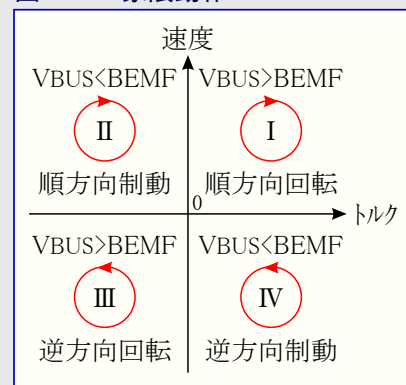
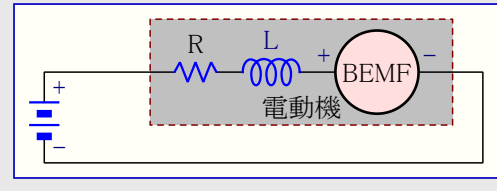


図3-11. 電動機の等価回路



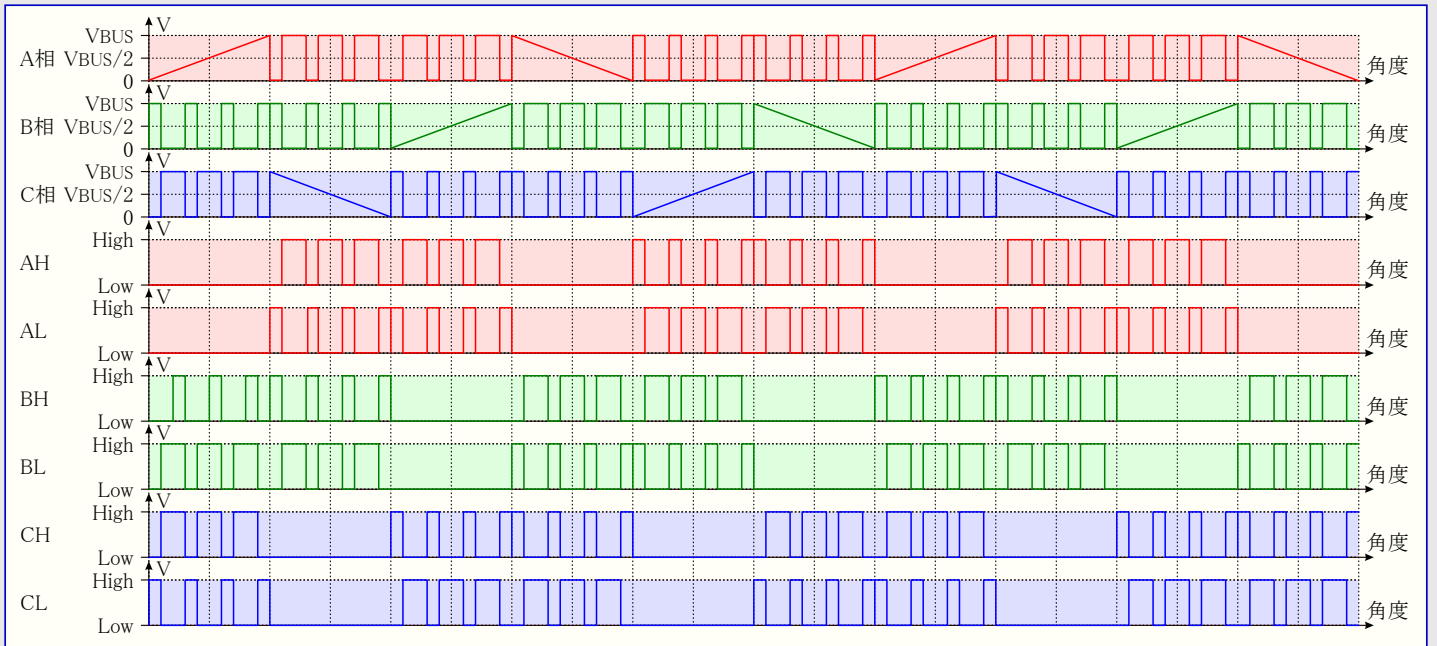
巻線の抵抗とインダクタンスはRPM範囲を通して静的ですが、BEMFはRPMに直接比例します。

$$\text{BEMF} = \text{RPM} / K_v$$

BEMFの振幅はPWMデューティ係数で乗算された供給電圧に等しくなります(双極動作については50%デューティが0Vを意味します)。電動機はどの負荷も持たなければ、BEMFの振幅は完全デューティサイクルで供給電圧に近づきます。

過電圧状態から系と電源を保護するため、バス上の電圧を監視する追加回路が必要とされます。

図3-12. 双極切り替えの相電圧と指令信号



3.5. 0交差点検出

この実装に於いて、0交差点を測定するのに使われる方法は全ての相電圧の合計から成る可変参照基準で比較器を使うことによります。

中立電圧は $V_n = (\text{BEMF}_A + \text{BEMF}_B + \text{BEMF}_C) / 3$ として表すことができ、ここでの V_n は仮想中立電圧、 BEMF_A はA相でのBEMF電圧、 BEMF_B はB相でのBEMF電圧、 BEMF_C はC相でのBEMF電圧です。

巻線インピーダンスの非対称性のため、仮想中立信号は一定ではありませんが、駆動周期に基づいて変化します。整流(転流)点でのどの相移動も避けるため、仮想中立点は過度に濾波されてはなりません。高周波数雑音だけが低RC時定数低域通過濾波器で抑制さなければなりません。

仮想接地の不規則性は図3-14で見ることができ、ここで最初の3つの波形は3つの相の各々に対するPWM信号を表し、4つ目の波形は仮想接地を表します。

図3-13. 比較器を使う0交差点検出

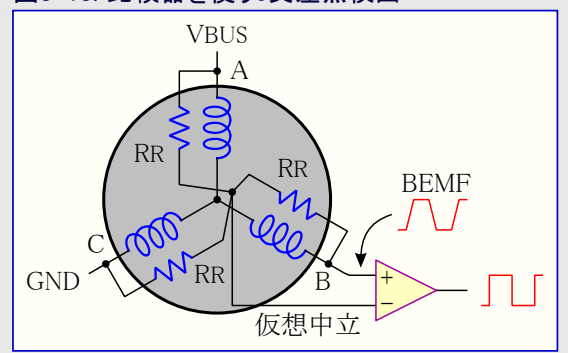
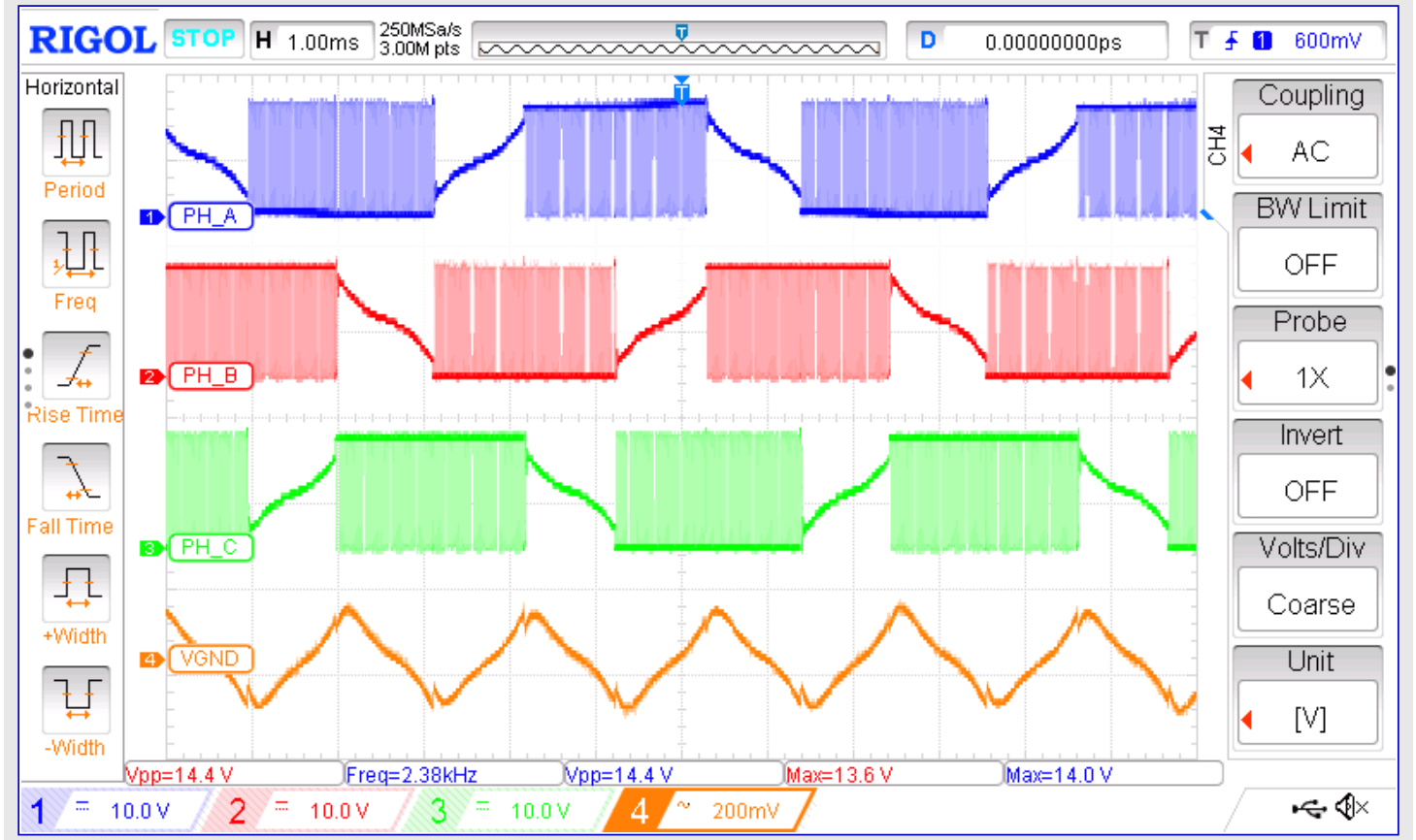


図3-14. 仮想接地波形



4. ファームウェア実装

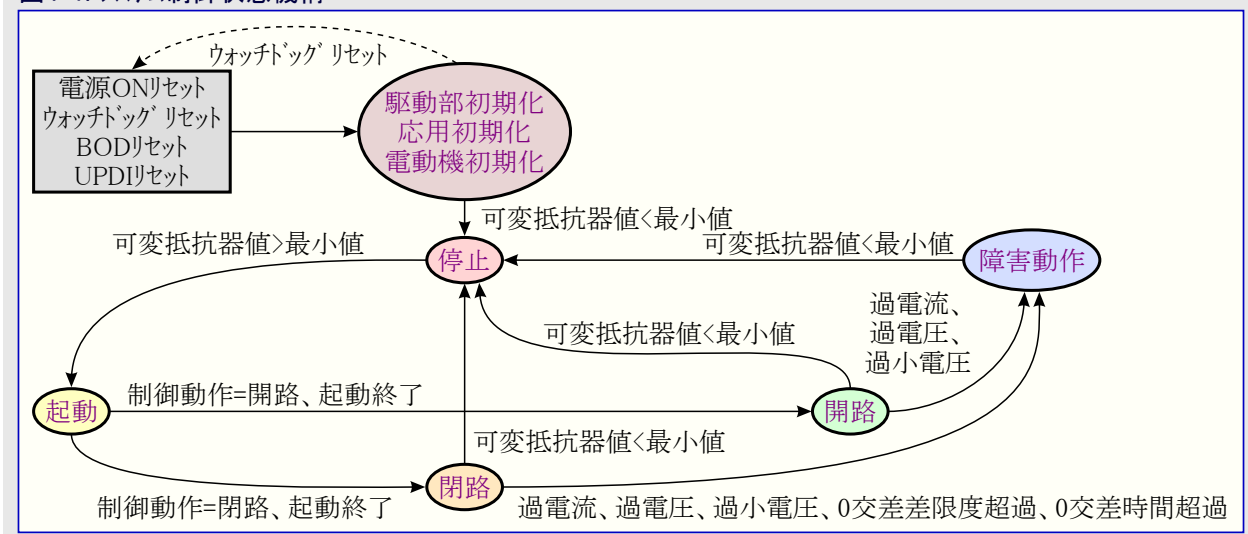
本章は特定作業を達成するための内部AVR周辺機能の使い方を提示し、ファームウェアが電動機制御系としてどう動くかを記述します。

4.1. システム概要

システム状態機構

ファームウェアは系の動きを制御する状態機構に基づきます。これは障害処理、リセット情報を提供し、UART経由で送信される異常メッセージを利用することによるデバッグを許します。

図4-1. システム制御状態機構



システム通電で、系制御状態は**駆動部初期化**、**応用初期化**状態に設定されます。これは系が何れかのリセット後になる既定状態です。リセット原因を識別するため、特定事象について使用者に通知するようメッセージが出力されます。系が直ぐに開始しないのを保証するため、可変抵抗器値が予め調べられます(例えば、電動機が全速だった間に系に対して外部リセットがあった場合、電動機と電力段を保護するために直ぐの開始を許さないでしょう)。条件が合わなければ、ウォッチドッグが起動され、マイクロコントローラをリセットします。

PWM信号配線

6段階の台形制御のため、マイクロコントローラによって3つの半ブリッジ駆動部が制御されなければなりません。TCDは2つの半ブリッジ駆動部だけの直接制御を許す4つの波形出力だけを持ちます。他の2つの相は構成設定可能な注文論理回路(CCL:Configurable Custom Logic)の手助けで作成されます。

TCD周辺機能のWOCとWODの出力がマイクロコントローラの物理的なピンで利用可能で、それらがC相を駆動するのに使われます。

TCD周辺機能のWOAとWOBの出力は他の2つの相を制御するのに使われます。CCL論理回路の手助けでWOAとWOBの信号は2つの異なるピン対で利用可能です。

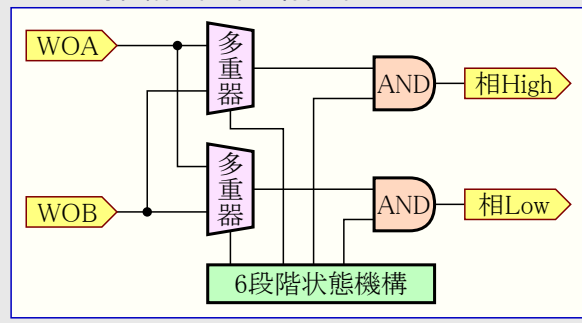
系の動きに基づく1つの相に対する等価論理回路は真理値表(TRUTHn)レジスタを通して構成設定されます。

CCL論理回路はPWM信号の半ブリッジ駆動部への賢い配線を実装し、下の使用事例で記述されるように、1つの補完PWM対(WOAとWOB)だけを使って電動機の2つの相の制御を許します。

相の特定状態がLowの場合、WOAがLow側トランジスタに配線される一方で、WOBはHigh側トランジスタに配線されます。

相の特定状態がHighの場合、WOAがHigh側トランジスタに配線される一方で、WOBはLow側トランジスタに配線されます。

図4-4. 等価論理回路配線回路図



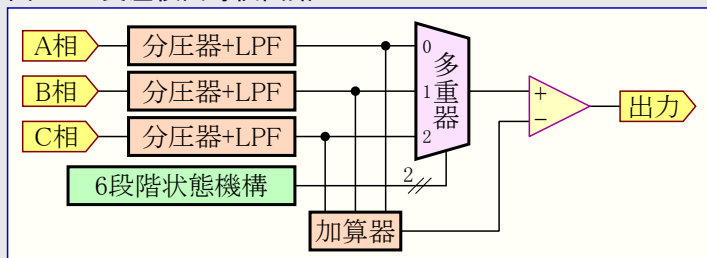
4.3. 0交差検出

0交差点は正確な切り替え点を保証するために高い精度で検出されなければなりません。各相上に存在する電圧の振幅は分圧器を使って減らされ、その後低域通過RC濾波器で濾波されます。

濾波された電圧を全ての相電圧の合計として提供される電動機の仮想中立点と比較するのに1つの内部比較器(AC1)が使われます。

ここで使われるAC1比較器は組み込み多重器の手助けで選択可能な複数の反転と非反転の入力を持ちます。この特徴は状態機構によってAC1入力切り替えに使われ、3つ全ての相に対して1つ(だけ)のACの使用を許し、従って、必要とされる周辺機能の数を減らします。図4-5は0交差点を検出するのに使われる等価回路を記述します。

図4-5. 0交差検出等価回路



4.4. 0交差濾波

いくつかの場合で、0交差点は雑音や電動機の特長のような他の要素のために理想の場合よりも早くまたは遅く検出されるかもしれません。

濾波法は電動機が固定化を外れ得る望まれない動きを避けるために使われます。

この濾波器の基本的な制限は次のようないくつかの簡単な規則に従うことが必要です。

- それが意図される目的を失敗させるため、濾波器の値は適度に速い速度変化でぐちゃぐちゃでない場合での電動機の反応時間に影響を及ぼすと言う点で積極的すぎではありません。
- それは望む結果を得るために長い時間がかかり、整流(転流)点を遅らせるため、濾波器は計算的負荷が高くてはなりません。
- 最良の結果を得るために最小通過遅延が必要とされます。

上の要件に基づき、1次IIR濾波器は次式を使う移動平均低域通過濾波器の形式下で選ばれます。

$$y(n) = \frac{y(n-1) \times (a-1) + x(n)}{a} \quad \text{ここで } y \text{ は濾波器の出力、 } x \text{ は入力、 } a \text{ は濾過器係数です。}$$

```
timerValue = (uint32_t) (((uint32_t) previous_zero_cross_time * (MOTOR_DIVISION_FACTOR - 1) +
(uint32_t) current_zero_cross_time)) / MOTOR_DIVISION_FACTOR;
```

理想的に、より速い計算のため、濾波器係数(MOTOR_DIVISION_FACTOR)は特定コア命令でビット移動を使って実装することができるように2のべき乗でなければなりません。

入力と出力の値は符号付き16ビット値で、従って、y(n-1)だけでなく総合計の乗算中の溢れを防ぐため、この操作は32ビット符号なし値への振り当て(キャスト)を使って行われます。

この応用の範囲については、濾波器係数用に4の値が最適と見做されました。

4.5. 30°タイミング

整流(転流)点と次の0交差点間の時間として30°待ち時間が定義されます。台形制御では、0交差が見つかり、系は整流(転流)の発生のために30°の電氣的角度間待たなければなりません。

整流(転流)がこれよりも早くまたはより遅く行われる時に、この時間のどの変化も進行または遅延と呼ばれることになっています。進行は加速中により大きなトルクを達成するために行われ、同様に、制動力は遅延中に増されます。

どの通過遅延に対しても補償するため、新しく計算された30°値から減算することによって固定進行値が実装され、整流(転流)点に対する進行時間に加算します。

これは次行のコードを使って行われます。

```
tempValue = timerValue - MOTOR_ADVANCE_TIME;
```

4.6. BEMF整流雑音消去

台形制御では、系が次の段階へ移る時に新しい段階に対する特有の浮き相のBEMFは整流(転流)雑音の影響を及ぼされます。これが誤った0交差点を起動し得るため、その後手順の捕獲を避けることが必要です。

これは空白時間と呼ばれ、電動機の数値に基づいて設定されなければなりません。例えば、空白時間が高速の筋書きで低速に対して良好な場合、その空白時間は充分すぎて0交差は捕獲されません。これは30°タイミングで利用した直前の値の半分を使うことによって計算されます。

4.7. 時間関連事象処理

電動機の駆動は大きく時間依存です。この系で時間関連事象を扱うのにTCA周辺機能の2つの実体とTCB周辺機能の1つの実体が使われます。

TCA周辺機能の1つ目の実体(TCA0)は系が起動/開路動作の時に電動機の数値を制御します。それは比較0(CMP0)レジスタからの値によって決められる間隔で周期的な割り込みを起動します。

CMP0レジスタから値を減らすことにより、割り込み周期が減り、電動機が加速されます。このレジスタの減少が止まると、電動機は固定周期で整流(転流)され、制御動作が開路動作に切り替えられます。

割り込み到達で、算法は次の台形段階に移り、その後、それを起動します。

これは以下のコード行を使って行われます。

```
tmr_ramp_up_compare_value -= MOTOR_TIMER_RAMP_UP_DECREMENT;
TCA0_setCMP0Value(tmr_ramp_up_compare_value);
```

```
#define MOTOR_TIMER_RAMP_UP_DECREMENT 800
```

TCA周辺機能の2つ目の実体(TCA1)は各段階中に時間に関連する電動機事象の駆動/処理に使われます。

1つの台形段階の間、計数器は次のような4つの目的を扱います。

- 空白時間を処理します。
- 整流(転流)点から0交差点までの時間を計数します。
- 0交差点から新しい整流(転流)点までの新しい計算された時間を計数します。
- 立往生検出(0交差制限時間超過)を処理します。

計数器は特定割り込みを起動するように構成設定されたそれら各々、3つの比較チャネルを持ちます。

操作方法が以下で記述されます。

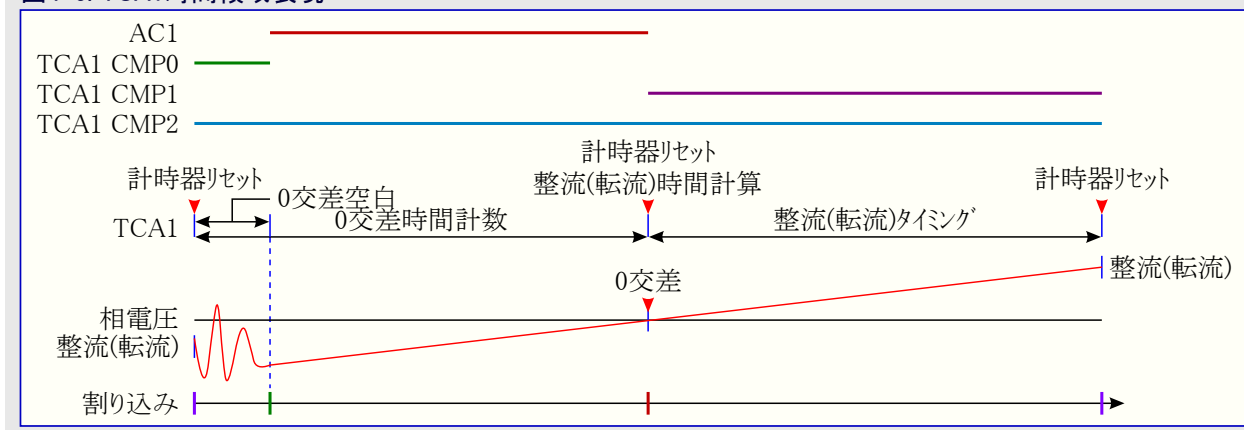
新しい整流(転流)後、計数(CNT)レジスタ値は解消され、CMP0割り込みが許可されます。

CMP0割り込み到達時、AC1割り込みが許可され、CMP0割り込みが禁止されます。

CMP2時間間隔内で0交差が見つかる場合、その後計時器が停止され、計数(CNT)レジスタ値が0交差濾波器で処理され、比較1(CMP1)レジスタに設定されます。計数(CNT)レジスタ値は再び一旦解消され、CMP1割り込みが許可されます。

計時器が比較1(CMP1)値に達すると、割り込みを起動し、次の段階へ整流(転流)し、CMP1割り込みを禁止し、この周回が繰り返されます。この部分の機能的な詳細な時間領域表現は図4-6で見ることができます。

図4-6. TCA1時間領域表現



TCB0タイマ/カウンタは時間が重要でない作業を動かすための非常に基本的な計画部のように働きます。これは割り込みを起動する比較(CCMP)レジスタに対して固定値を使い、主繰り返し内で調べられるSCHEDULER_mainLoopFlagを設定します。

4.8. 過電流保護

電動機、電力段、電源を保護するため、過電流保護法が必要とされます。これは電圧が両方向で振れるようにVDD/2のDC変位でのアナログ出力を与える分流器の手助けで達成されます。従って、VDD/2の値で系は0Aを引き出します。

より速い応答時間のため、過電流を検出するのに2つの内部アナログ比較器が窓動作で使われます。

窓の上限と下限は各比較器に対して1つで、2つのDACを使って生成されます。この電流窓によって生成される割り込みはシステムに障害状態を強制します。

4.9. 立往生検出

この実装は次のような3つの立往生検出の方法を使います。

- TCA1 CMP2割り込みを使う0交差制限時間超過
- 0交差差限度を使用。これは0交差が直前のものに基づいて検出された時の何れかの急な変更を電動機が持つ場合に電動機が立往生したと見做されることを意味します。
- 多分、立往生中、巻線を通る電流はかなり上昇し、過電流限度を超えるでしょう。

立往生検出の最も敏感な部分は始動です。電動機が開路動作で加速されて閉路に切り替える時に、システムは例えばBEMFが駆動される巻線と駆動されない巻線間の磁気結合の結果で、移動する磁石によって巻線で誘発される電圧でなくても、0交差が有効な誤った応答を得るかもしれません。

4.10. RPM測定

RPM測定は濾波された0交差の時間を使って行われます。これはRPMが台形段階の半分(0交差が見つかる点に対して電動機が整流(転流)する時点)だけを使って計算されることを意味します。このため、電動機RPM検出の精度は下がります。

その後RPMは0交差計時器値を使い、台形段階の持続時間を得るために2で乗算し、電気的な周期を得るために6で乗算して計算されます。この後、この値を単に式 $RPM=120/(T_e \times P)$ に差し込むだけで、ここでの T_e は電気的な周波数、 P は電動機に特有の極対数です。

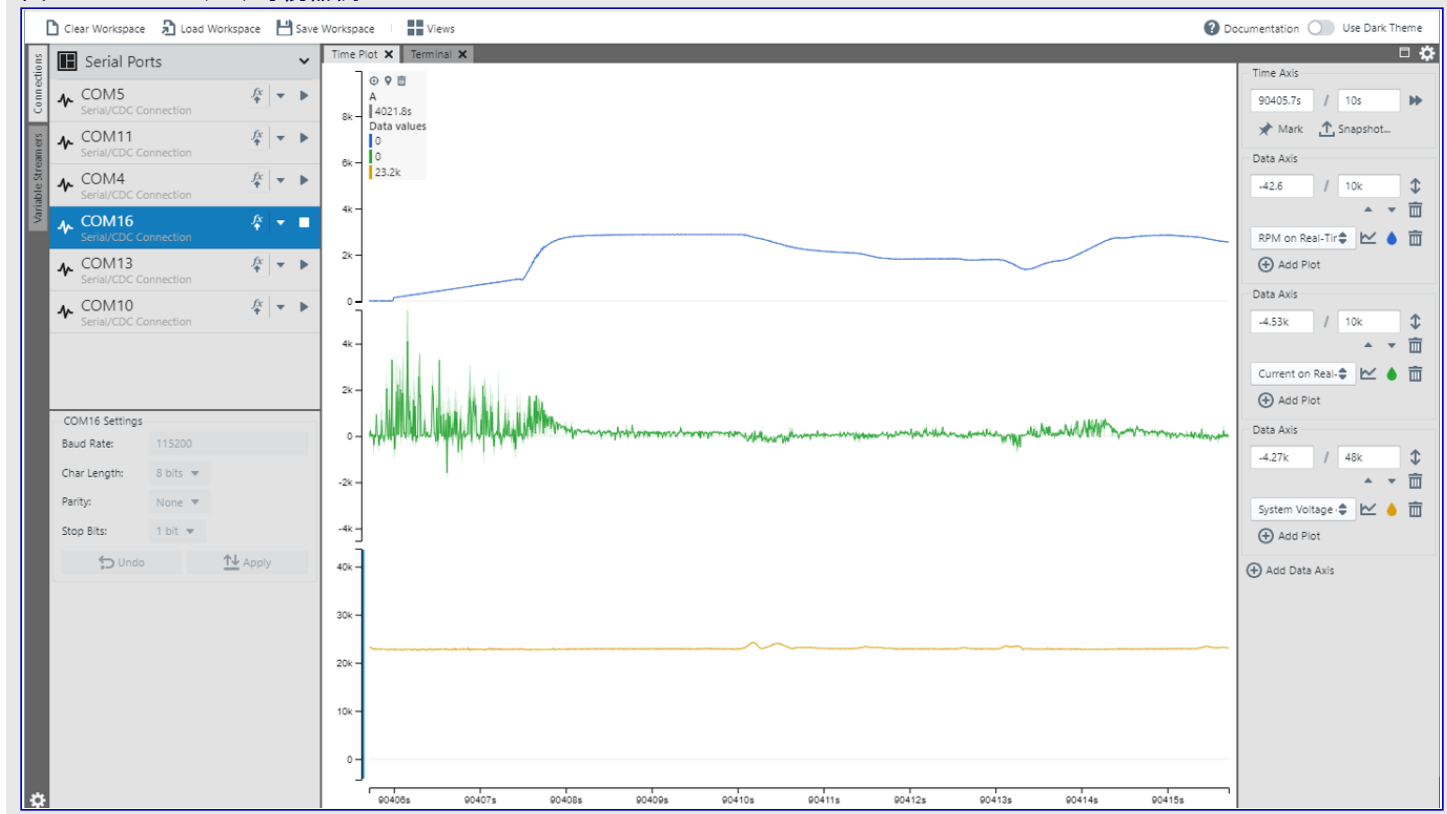
この影響に対する補償のため、TCA1タイマ/カウンタの前置分周器は低速で溢れないと同時に可能な最高の値も得るように調節されました。

最小RPM(即ち、整流(転流)と0交差信号間の最大時間間隔)で可能な最大値を得るため、最良の前置分周器を達成する手順は0交差計時器値を出力して前置分周器を変更することによって行われました。

4.11. デバッグ

生データを見て目標をデバッグするのにMPLAB®データ可視器(Data Visualizer)が使われます。

図4-7. MPLAB®データ可視器例



以下の変数を表示することができます。

- 分当たりの回転(RPM)での電動機速度
- mAでの電動機電流
- mVでのシステム電圧

更に、何れの障害や状態変更も表示するデバッグメッセージを許可してMPLABデータ可視器端末部分で見ることができます。以降のコード行はプロジェクトの応用領域、`app.c`ファイルで含まれます。一度に単一機能、デバッグメッセージまたはデータ可視器のどちらかだけが許可されることが強く推奨されます。既定でデバッグメッセージが表示されます。これらを許可するには31と33の行を注釈にし、30行の注釈を外してください。コードへのどの変更もプロジェクトを再コンパイルして再書き込みする必要があります。

図4-8. デバッグ任意選択

```

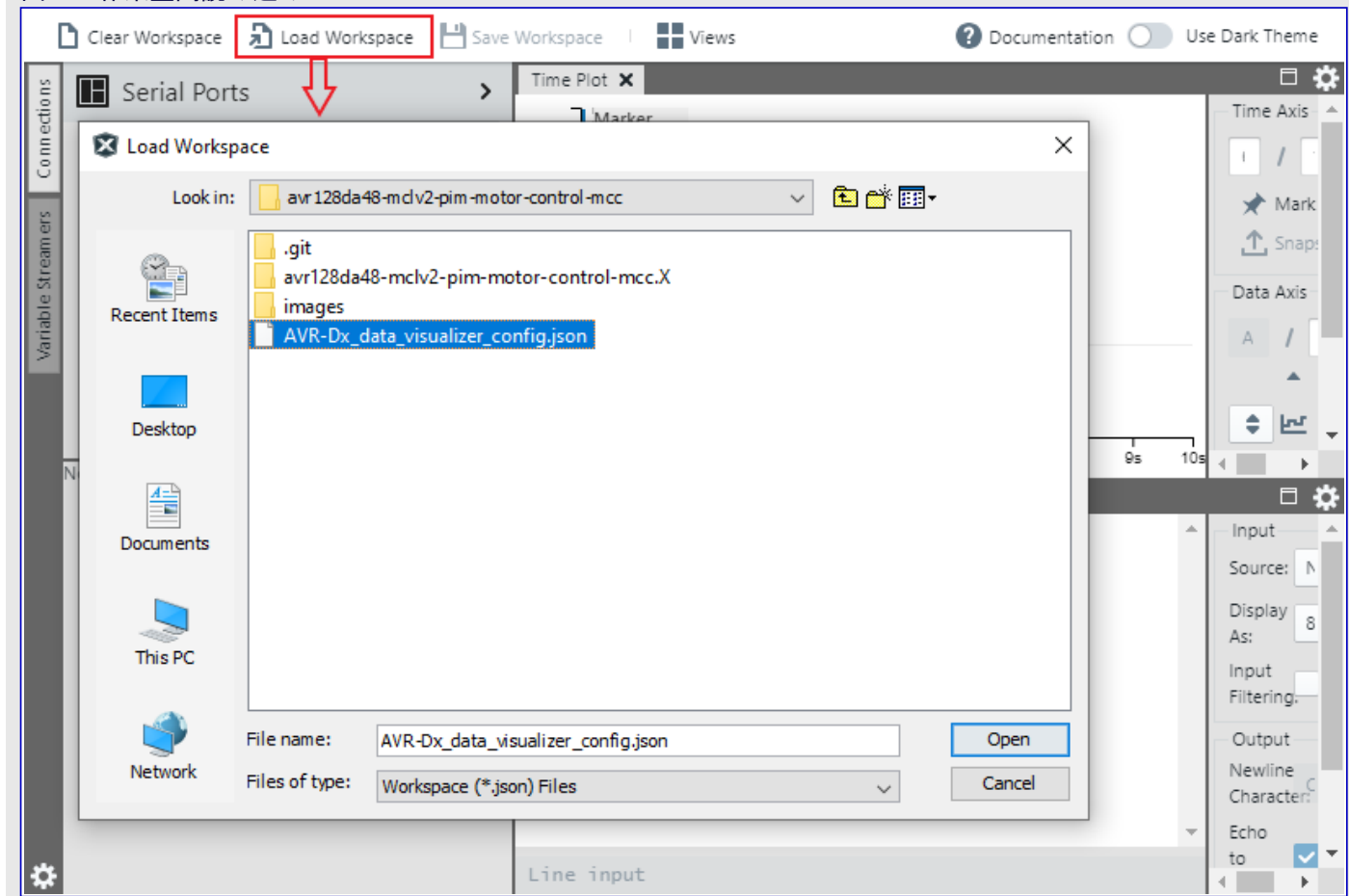
30 // #define COMM_debugPrint(x) printf(x) //comment to disable debug messages
31 #define COMM_debugPrint(x) //uncomment to disable debug messages
32
33 #define ENABLE_DATA_VISUALIZER () //comment to disable data visualizer

```

構成設定

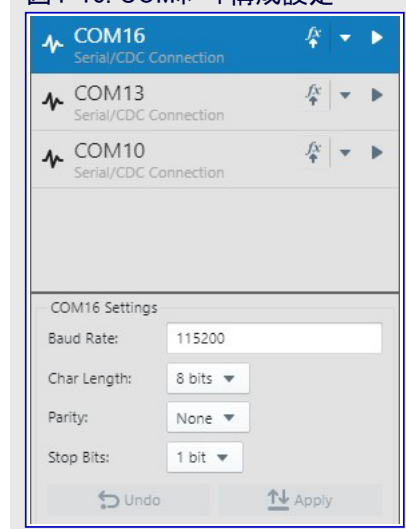
1. ミニUSBケーブルを使ってMCLV-2基板をPCに接続してください。
2. MPLABデータ可視器(Data Visualizer)プラグインがインストールされているのを確実にしてください。
 - 2.1. Tools(ツール)⇒Plug-ins(プラグイン)⇒Available plug-ins(利用可能なプラグイン)へ行き、MPLAB Data Visualizerを探してください。
3. MPLABデータ可視器(Data Visualizer)を開始して上部バーでLoad Workspace(作業空間読み込み)をクリックしてください。貯蔵庫の根元の.jsonファイルを選んでください。

図4-9. 作業空間読み込み



4. **Connections**(接続)タブで**COM port**(COMポート)を選び、**Baud Rate**(ボーレート)を**115200**に設定してください。構成設定の残りを図4-10.のようにして置いてください。

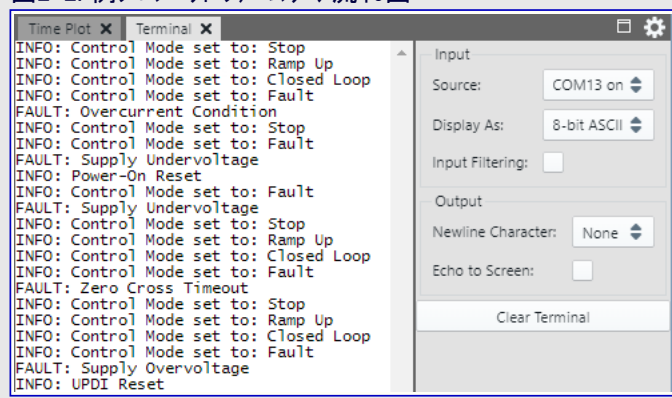
図4-10. COMポート構成設定



5. 選んだCOMポートに対して**Start streaming**(流し開始)釦を押してください。時間作図で追跡を見るには**Show Live Data mode**(生データ表示動作)が活性化にされる必要があります。

- デバッグメッセージが許可される場合(**app.c**ソースファイルマクロをご覧ください。)、それらは**8-bit ASCII**(8ビットASCII)に設定された**Display As**(表示形態)動作の**Terminal**(端末)タブで見ることができます。

図2-2. 例プロジェクト ファームウェア流れ図



5. プラグイン単位部(PIM)基板説明

AVR Dx PIMは次のように2つの別形があります。

- ・ 内部演算増幅器別形: 内部演算増幅器を含むAVR128DB48マイクロコントローラに基づきます。
- ・ 外部演算増幅器別形: AVR128DA48マイクロコントローラに基づき、平常版を表し外部MCLV-2演算増幅器を使います。

図5-1. 内部演算増幅器を持つAVR® DB PIM

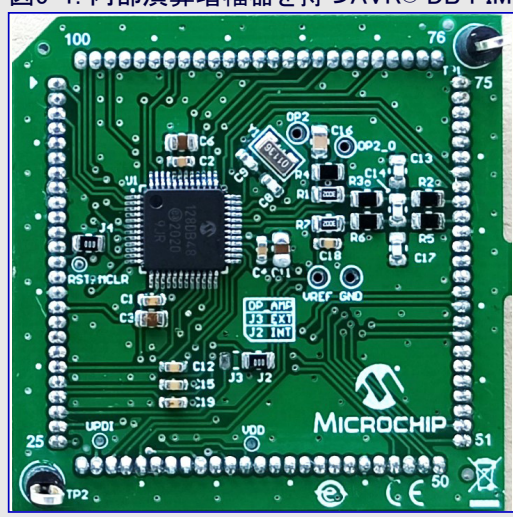
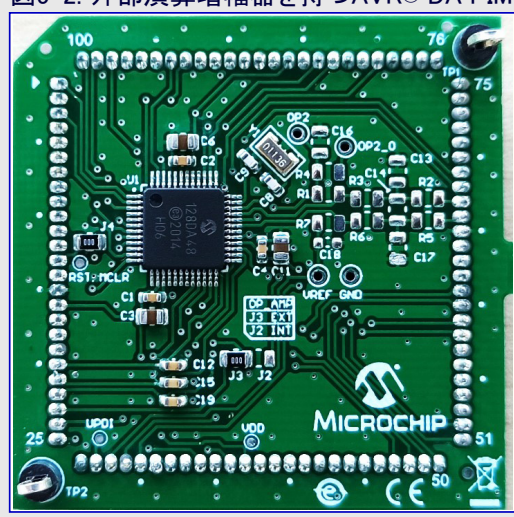


図5-2. 外部演算増幅器を持つAVR® DA PIM



内部演算増幅器の使用は主にAVR DB系のように演算増幅器を含むマイクロコントローラに依存し、外部演算増幅器の必要をなくします。増幅した電流はその後にソフトウェア調整可能な限度で比較器窓を通して供給され、PIM上の単一選択ジャンパを変更することによって内部または外部の参照基準間を選ぶことを使用者に可能にします。

分流器と電動機のBEMFからの両信号にアクセスするには特別な構成設定基板が必要とされます。PIMと同じ一括でやって来ます。これは内部演算増幅器電流参照基準を使う時にだけ必要とされます。けれども、PIMが外部演算増幅器で動くように構成設定される場合、提供されるMCLV-2 EXTERNAL OP_AMP構成設定基板でも動くことができます。

5.1. ピン割り当て

表5-1. は100ピンPIMと48ピン デバイス間の割り当てを提供します。

表5-1. ピン割り当て表 (PIMピン番号による整列)

PIMピン番号	信号名	ピン説明	AVR [®] Dxピン	PIMピン番号	信号名	ピン説明	AVR [®] Dxピン
1	DBG_LED2	デバッグLED2	PA5	51	USB_TX	(U7へ直接接続された)UART送信	PB1
2	VDD	デジタル供給電源	VDD	52	USB_RX	(U7へ直接接続された)UART受信	PB0
3	PWM1H3	PWM出力 - 3H	PA6	58	PIM_FLT_OUT2	汎用入出力	PC6
13	MCLR	デバイス主解除(リセット)	PF6	59	PIM_FLT_OUT1	汎用入出力	PC5
15	VSS	デジタル供給電源	GND	60	DBG_LED1	デバッグLED1	PC0
16	VDD	デジタル供給電源	VDD	61	HOME	QEI用原点信号	PC7
18	FAULT	DCバス電流障害(Low活性論理)	PC2	62	VDD	デジタル供給電源	VDD
19	TX	UART送信	なし	63	OSC1/CLKO	クリスタル用発振器入力	なし
20	PIM_V_M3	電圧帰還信号	PD4	64	OSC2/CLKI	クリスタル用発振器出力	なし
21	PIM_V_M2	電圧帰還信号	PD6	65	VSS	デジタル供給電源	GND
22	PIM_V_M1	電圧帰還信号	PD3	66	PIM_IBUS+	バス分流器信号	なし
23	PIM_IMOTOR_SUM	DCバス電流信号	PD2	67	PIM_IBUS-	バス分流器信号	なし
24	PIM_IMOTOR2	相電流信号	PE0	68	LIN_CS	LINチップ選択信号	PA2
25	PIM_IMOTOR1	相電流信号	PF2	69	LIN_FAULT	LIN障害信号	PC1
26	PGC	デバイスプログラミングクロック線	なし	70	RX	UART受信	なし
27	PGD	デバイスプログラミングデータ線	UPDI	72	USB_RX	(U7へ直接接続された)UART受信	なし
28	VREF	参照基準電圧(AVDD電圧の半分)	PD7	73	PIM_IB+	IMOTOR1分路信号	なし
29	PIM_REC_NEUTR	再構築した電動機中立線電圧	PD5	74	PIM_IA+	IMOTOR2分路信号	なし
30	AVDD	アナログ供給電源	AVDD	75	VSS	デジタル供給電源	GND
31	AVSS	アナログ供給電源	GND	76	USB_TX	(U7へ直接接続された)UART送信	なし
32	PIM_POT	可変抵抗器信号	PD0	77	CAN_TX	CAN送信	なし
34	PIM_GEN2	汎用入出力	PA4	78	CAN_RX	CAN受信	なし
35	PIM_VBUS	(縮尺した)DCバス電圧	PD1	80	HALLA	ホール感知器/QEI入力	PB2
36	VSS	デジタル供給電源	GND	82	PIM_GEN1	汎用入出力	なし
37	VDD	デジタル供給電源	VDD	83	BTN_1	押し釦S2入力	PF5
41	PIM_MOTOR_1	ホール感知器/電流感知/電圧帰還信号	なし	84	BTN_2	押し釦S3入力	PF4
42	PIM_MOTOR_2	ホール感知器/電流感知/電圧帰還信号	なし	86	VDD	デジタル供給電源	VDD
43	PIM_MOTOR_3	ホール感知器/電流感知/電圧帰還信号	なし	87	CAN_RX	CAN受信	なし
45	VSS	デジタル供給電源	GND	88	CAN_TX	CAN送信	なし
46	VDD	デジタル供給電源	VDD	93	PWM1L1	PWM出力 - 1L	PC3
47	HALLB	ホール感知器/QEI入力	PB5	94	PWM1H1	PWM出力 - 1H	PA3
48	HALLC	ホール感知器/QEI入力	PB4	98	PWM1L2	PWM出力 - 2L	PF3
49	RX	UART受信	PA0	99	PWM1H2	PWM出力 - 2H	PB3
50	TX	UART送信	PA1	100	PWM1L3	PWM出力 - 3L	PA7

注: 1. デジタル電源(VDD)はPIMに接続されます。

2. デジタル接地(VSS)とアナログ接地(AVSS)はPIMに接続されます。

表5-2. は48ピン デバイスと100ピンPIM間の割り当てを提供します。

表5-2. ピン割り当て表 (AVR® Dxピン名による整理)

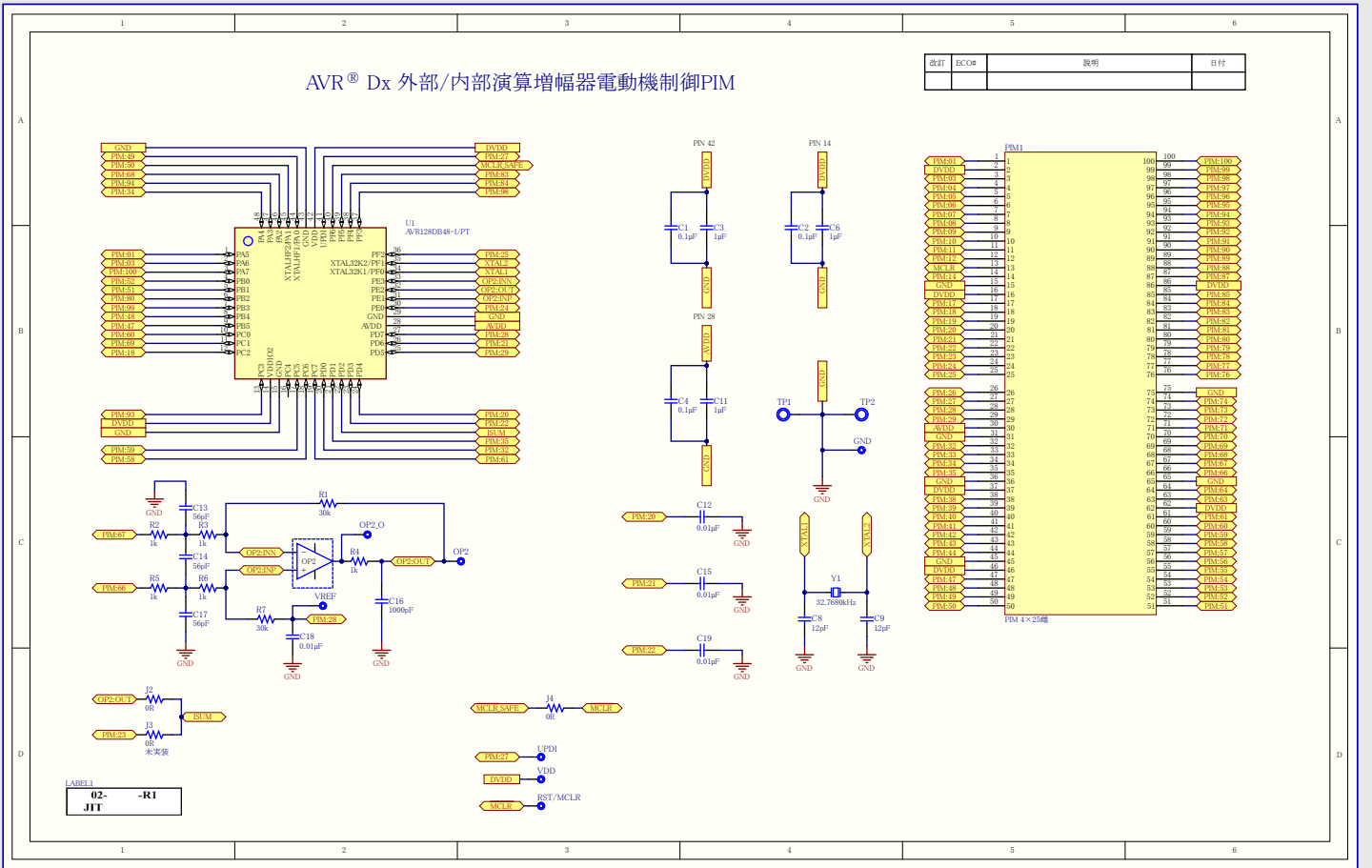
PIMピン 番号	信号名	ピン説明	AVR® Dxピン	PIMピン 番号	信号名	ピン説明	AVR® Dxピン
30	AVDD	アナログ供給電源	AVDD	52	USB_RX	(U7へ直接接続された)UART受信	PB0
31	AVSS	アナログ供給電源	GND	51	USB_TX	(U7へ直接接続された)UART送信	PB1
15	VSS	N/A	GND	80	HALLA	ホール感知器/QEI入力	PB2
36	VSS	N/A	GND	99	PWM1H2	PWM出力 - 2H	PB3
45	VSS	N/A	GND	48	HALLC	ホール感知器/QEI入力	PB4
65	VSS	N/A	GND	47	HALLB	ホール感知器/QEI入力	PB5
75	VSS	N/A	GND	60	DBG_LED1	デバッグLED1	PC0
19	TX	UART送信	なし	69	LIN_FAULT	LIN障害信号	PC1
26	PGC	デバイスプログラミングクロック線	なし	18	FAULT	DCバス電流障害(Low活性論理)	PC2
41	PIM_MOTOR_1	ホール感知器/電流感知/電圧帰還信号	なし	93	PWM1L1	PWM出力 - 1L	PC3
42	PIM_MOTOR_2	ホール感知器/電流感知/電圧帰還信号	なし	59	PIM_FLT_OUT1	汎用入出力	PC5
43	PIM_MOTOR_3	ホール感知器/電流感知/電圧帰還信号	なし	58	PIM_FLT_OUT2	汎用入出力	PC6
63	OSC1/CLKO	クリスタル用発振器入力	なし	61	HOME	QEI用原点信号	PC7
64	OSC2/CLKI	クリスタル用発振器出力	なし	32	PIM_POT	可変抵抗器信号	PD0
66	PIM_IBUS+	バス分路器信号	なし	35	PIM_VBUS	(縮尺した)DCバス電圧	PD1
67	PIM_IBUS-	バス分路器信号	なし	23	PIM_IMOTOR_SUM	DCバス電流信号	PD2
70	RX	UART受信	なし	22	PIM_V_M1	電圧帰還信号	PD3
72	USB_RX	(U7へ直接接続された)UART受信	なし	20	PIM_V_M3	電圧帰還信号	PD4
73	PIM_IB+	IMOTOR1分路信号	なし	29	PIM_REC_NEUTR	再構築した電動機中立線電圧	PD5
74	PIM_IA+	IMOTOR2分路信号	なし	21	PIM_V_M2	電圧帰還信号	PD6
76	USB_TX	(U7へ直接接続された)UART送信	なし	28	VREF	参照基準電圧(AVDD電圧の半分)	PD7
77	CAN_TX	CAN送信	なし	24	PIM_IMOTOR2	相電流信号	PE0
78	CAN_RX	CAN受信	なし	25	PIM_IMOTOR1	相電流信号	PF2
82	PIM_GEN1	汎用入出力	なし	98	PWM1L2	PWM出力 - 2L	PF3
87	CAN_RX	CAN受信	なし	84	BTN_2	押し釦S3入力	PF4
88	CAN_TX	CAN送信	なし	83	BTN_1	押し釦S2入力	PF5
49	RX	UART受信	VDD PA0	13	MCLR	デバイス主解除(リセット)	PF6
50	TX	UART送信	PA1	27	PGD	デバイスプログラミングデータ線	UPDI
68	LIN_CS	LINチップ選択信号	PA2	2	VDD	N/A	VDD
94	PWM1H1	PWM出力 - 1H	PA3	16	VDD	N/A	VDD
34	PIM_GEN2	汎用入出力	PA4	37	VDD	N/A	VDD
1	DBG_LED2	デバッグLED2	PA5	46	VDD	N/A	VDD
3	PWM1H3	PWM出力 - 3H	PA6	62	VDD	N/A	VDD
100	PWM1L3	PWM出力 - 3L	PA7	86	VDD	N/A	VDD

注: 1. デジタル電源(VDD)はPIMに接続されます。

2. デジタル接地(VSS)とアナログ接地(AVSS)はPIMに接続されます。

5.2. PIM回路図

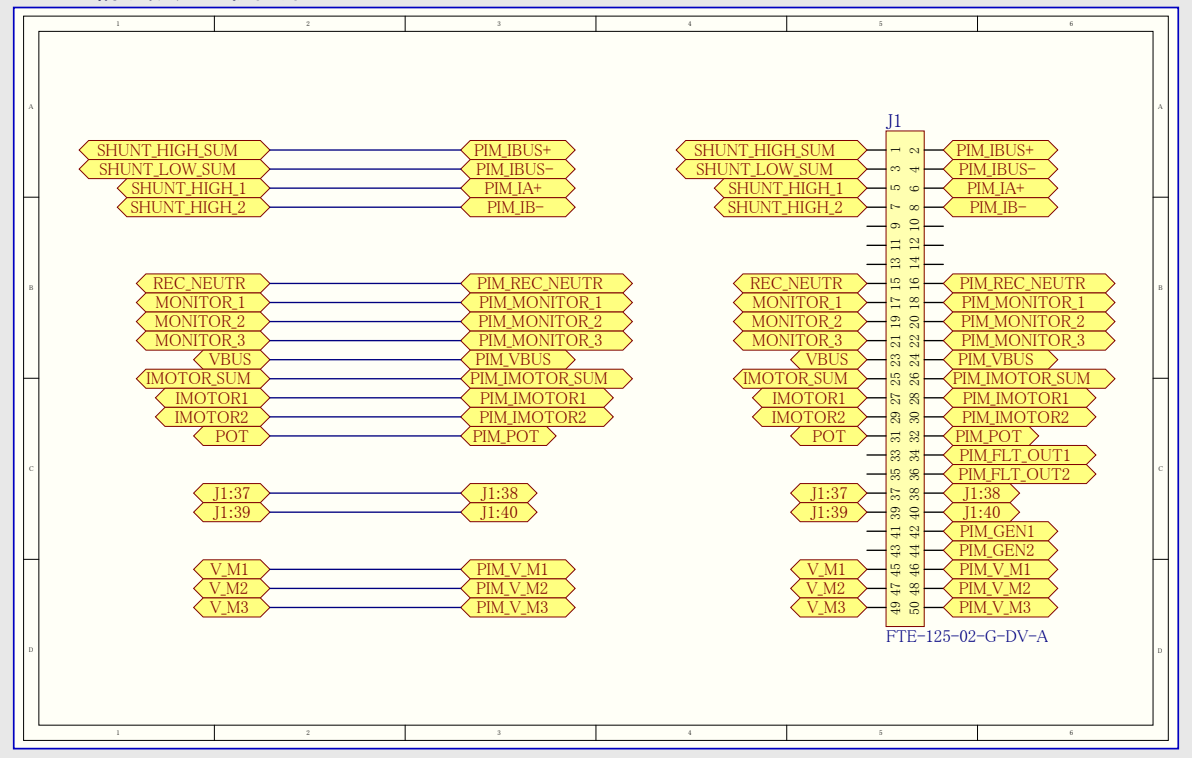
図5-3. PIM回路図



- 注: 1. ジャンパのJ2とJ3は外部と内部の演算増幅器切り替えに使われます。
 2. J4ジャンパは不測のHVプログラミング動作に対してマイクロ コントローラを保護するため抵抗器で置き換えることができます。

5.3. 構成設定基板回路図

図5-4. 構成設定基板回路図



5.4. アナログ機能

表5-3. 内部演算増幅器パラメータ

演算増幅器番号	アナログ機能	受動部品	設計式
2	低域通過濾波器	R2, R3, R5, R6, C13, C14, C17	$R2=R3=R5=R6=R, C13=C17=C, R1=R7$
	参照基準電圧バイアス	R1, R7	同相動作 $f_{-3dB} \doteq \frac{1}{2\pi RC}$ 差動動作 $f_{-3dB} \doteq \frac{1}{2\pi(2R)(C/2+C14)}$
	差動増幅器入力	R2, R3, R5, R6	差動増幅器利得 $\doteq \frac{R7}{2R}$
	差動増幅器帰還	R1	

図5-5. 内部演算増幅器構成設定

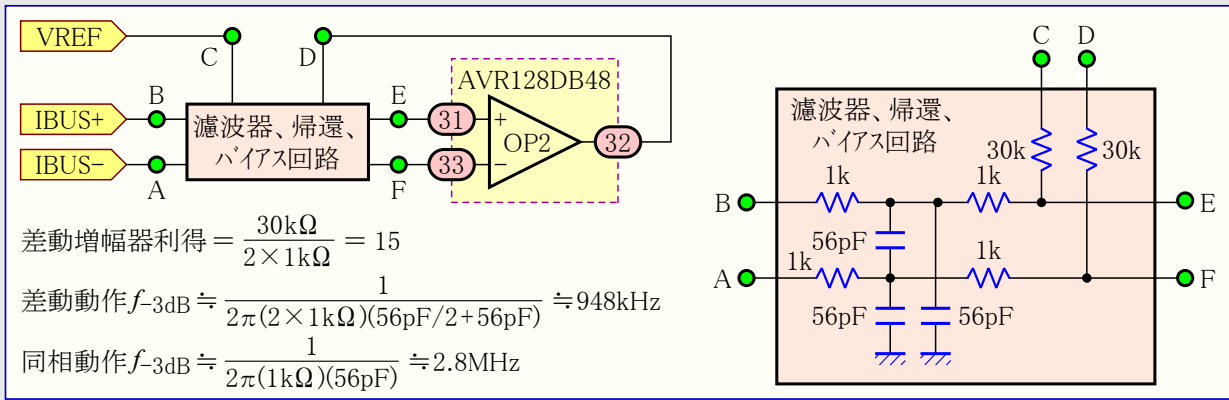
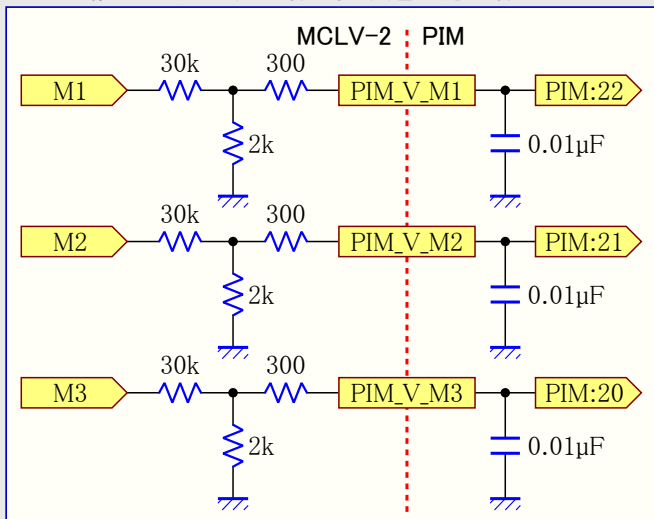


図5-6. 相BEMF用の分圧器と低域通過濾波器



$$\text{カットオフ周波数 } f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi(30k\Omega // 2k\Omega + 300\Omega)0.01\mu F} \doteq 7321Hz$$

$$30^\circ \text{ 相移動周波数} = \frac{\tan(30)}{2\pi(30k\Omega // 2k\Omega + 300\Omega)0.01\mu F} = 4226Hz$$

従って、電動機の理論的な最大速度は次のようになります。

$$4226Hz \times 60 \doteq 253560 \text{ eRPM}$$

$$\text{機械的なRPM} = \text{eRPM} / \text{極対数}$$

5.5. 使用者インターフェース

表5-4. はAVR Dx PIMを使うMCLV-2基板での使用者インターフェースを記述します。

表5-4. 使用者インターフェース説明

インターフェース	型式	機能	説明
S1	入力	リセット	この釦押下はマイクロコントローラをリセットし、系を駆動部初期化/応用初期化状態にさせます。
S2	入力	開始/停止	電動機を開始または停止。異常処理(障害動作)状態の場合、この釦押下は系を停止状態にさせます(PWM LEDのD10とD12消灯、D14点灯)。
S3	入力	変更方向	電動機の変更方向。これは系が停止状態の時にだけ動きます。方向の変更は方向LEDも変更します。
POT1	入力	デューティサイクル設定	PWM信号のデューティサイクルを直接設定。
D2, D7	出力	電動機方向表示	電動機を表示(電動機配線に応じてCWまたはCCW)。
D10~D15	出力	PWM出力	PWM出力が有効の場合の可視化表示。LEDがONにされないのはOFFされたか、または異常処理(障害動作)状態のどちらかを意味します。

6. 調整

6.1. 最初の始動

電動機は24V供給電圧が提供されて既定値が使われる場合に問題なしで開始するでしょう。

けれども、使われる電動機の極対数が既定構成設定で使ったものと違うかもしれません。これがその場合なら、標準的な動きが示されますが、MPLABデータ可視器(Data Visualizer)で見られるRPMは不正な値を持つでしょう。

この問題を修正するには、[AVR_Dx_tuning_params.xslm](#)エクセルファイル内の次のような2つの領域が変更されることが必要です。

- ・ 電動機極対数：使われる電動機に従って変更してください。
- ・ 目的RPM：以下のような式に従って変更してください。
 - 新RPM = 新極対数 × 旧RPM / 旧極対数
 - 数値を最も近い整数に丸めてください。

結果が適切で電動機応答が正しいなら、調整は必要ありません。

6.2. エクセル ファイル パラメータ調整

電動機が開始に失敗する、または良好な性能を示さないかもしれません。

図6-1. エクセル ファイルの編集可能なパラメータ

	A	B	C	D
	Parameter	Value	Description	Range
1	Startup PWM Duty [%]	25	Startup duty cycle in percents	1 - 100
2	Rotor align time [ms]	250	Rotor align time in which the duty is raised to the startup PWM duty above	1 - 14000
3	Target RPM [RPM]	800	Final RPM after startup. This becomes the minimum RPM(also see tolerance below)	
4	Initial startup period [ms]	300	From where to start the ramp. Never start from zero.	1 - 1000
5	Ramp duration [ms]	2000	Total ramp time without sustain	100 - 5000
6	Ramp sustain duration [ms]	1	Time in which the motor is kept at a constant speed after acceleration	1 - 5000
7	Holdoff steps	1	How many trapezoidal steps have the PWM disabled, after the sustain zone	1-250
8	Motor pole pairs	4	The number of motor pole pairs	1 - 255
9	Minimum PWM duty [%]	20	Minimum PWM duty value in percents - Indirectly limits the minimum speed	0 - 100
10	Maximum PWM duty[%]	100	Minimum PWM duty value in percents - Indirectly limits the maximum speed	0 - 100
11	Braking PWM duty [%]	90	PWM duty cycle for the non-regenerative braking	0 - 100
12	Motoring current limit[mA]	4420	Maximum current allowed to draw from the supply. Triggers a fault condition	0 - 4420
13	Braking current limit[mA]	-4420	Maximum current allowed to push to the supply. Triggers a fault condition	-4420 - 0
14	Undervoltage protection[mV]	11000	Maximum supply voltage. Triggers a fault condition	11000-48000
15	Overvoltage protection[mV]	25000	Minimum supply voltage. Triggers a fault condition	11000-48000
16	Moving average filter division factor	8	Higher values eliminates glitches but has slower response. Set as power of 2	1 - 128
17	Advance angle[Deg]	0	Advance angle for the next sector timing	0 - 30
18	Passthrough delay compensation[us]	200	Fixed compensation time for any hardware or software delays	1-1000
19	Delta division factor	1	Maximum variation of the current zero cross time expressed as (previous time/factor)	0-8(disabled for 0)
20	Minimum RPM tolerance[%]	40	Minimum RPM for closed loop mode. Subtracts this percentage from the startup RPM	0-100

以降の項はパラメータ調整とそれらの系の動きでの影響に集中します。

1. **Start-up PWM Duty [%]** (始動PWMデューティ) – %で始動デューティサイクルを表します。低すぎる値は巻線を通る電流が小さすぎて生成される磁界が回転子に追従するのに十分な強さでないため、起動手順に対して不十分になるかもしれません。
高すぎる値は過電流保護の起動や巻線の過熱になるでしょう。始動デューティサイクルは始動での電動機負荷にも強く依存します。より高い負荷はより高いデューティサイクルを要求します。
このパラメータは**起動手順**にだけ適用します。
2. **Rotor align time [ms]** (回転子整列時間) – msでの回転子整列時間。デューティサイクルは機械的な衝撃がないように0%から始動PWMデューティ値まで直線状傾斜を使って徐々に増されます。この整列は電動機を既知の位置から開始するために行われます。
このパラメータは**起動手順**にだけ適用します。
3. **Target RPM [RPM]** (目標RPM) – これは起動手順後の最終RPMです。高すぎる設定の場合、高RPMで電動機が磁界に追従することができるようにより高いデューティサイクルが必要になるでしょう。
このパラメータは**起動手順**だけに適用しますが、**閉路制御**もこれに依存します。
4. **Initial start-up period [ms]** (初期始動期間) – 起動の開始点。一般的にこのパラメータを調節する必要はありません。
このパラメータは**起動手順**だけに適用します。
5. **Ramp duration [ms]** (起動持続時間) – どれ位起動が続くかを設定します。より速い始動時間に対してはこの値をより低くします。強い加速はより高いデューティサイクルを要求することにも注意してください。
このパラメータは**起動手順**だけに適用します。
6. **Ramp sustain duration [ms]** (起動維持時間) – 電動機が加速される起動手順後、電動機が**Target RPM**(目標RPM)速度で回される維持時間があります。制御器の調教のためになり得るPI制御器が使われない限り、このパラメータを最小に保つことが推奨されます。
このパラメータは**起動手順**だけに適用します。

7. **Hold-off steps** (阻止段階) – **起動**手順直後、PWMが禁止され、比較器が許可されます。これはどの相の雑音もない時に電動機の正確な位置を検出するために行われます。このパラメータは非常に低い電動機の相電圧の変動がある場合を除いて最小の1を保つことが必要です。
このパラメータは**起動**手順にだけ適用します。
8. **Motor poole pairs** (電動機極対数) – 電動機の極対数。
9. **Minimum PWM duty [%]** (最小PWMデューティ) – 最小PWMデューティサイクル。電動機の最低速度を制限するのにこのパラメータを使ってください。
このパラメータは**閉路**と**開路**の制御に適用します。
10. **Maximum PWM duty [%]** (最大PWMデューティ) – 最大PWMデューティサイクル。電動機の最高速度を制限するのにこのパラメータを使ってください。
このパラメータは**閉路**と**開路**の制御に適用します。
11. **Braking PWM duty [%]** (制動PWMデューティ) – 停止動作での電動機に対するデューティサイクル。系は高速での制動によって起こされた過電流から保護されます。この場合、ファームウェアは**障害**状態になり、トランジスタを保護します。
このパラメータは**停止**状態だけに適用します。
12. **Motoring current limit [mA]** (駆動電流制限) – **障害**状態が起動された範囲でバスから引き出され得る最大電流値。最大値はMCLV-2によって4420mAに制限されます。
このパラメータは異常処理状態を除く全ての系状態に適用します。
13. **Braking current limit [mA]** (駆動電流制限) – **障害**状態が起動された範囲でバスに押し込まれ得る最大電流値。最大値はMCLV-2によって-4420mAに制限されます。
このパラメータは異常処理状態を除く全ての系状態に適用します。
14. **Undervoltage protection [mV]** (過小電圧保護) – MCLV-2に対するバスでの最小電圧。11V未満に設定しないでください。
このパラメータは異常処理状態を除く全ての系状態に適用します。
15. **Overvoltage protection [mV]** (過電圧保護) – MCLV-2に対するバスでの最大電圧。単一供給を使う場合に24Vを超えて、両供給を使う場合に48Vを超えて設定しないでください(**MCLV-2**使用者の手引きをご覧ください)。
このパラメータは異常処理状態を除く全ての系状態に適用します。
16. **Moving average filter division factor** (移動平均濾波器除算係数) – それがコンパイラによって右移動で最適化できるため、2のべき乗として設定されるのが必要な0交差時間の移動平均濾波器除算係数。系がどの誤信号に対してもより高い耐性を持つため、より大きな値が推奨されますが、2つの0交差事象間の最大変動を制限し、従って、電動機の最大加速を制限します。
このパラメータは**閉路**制御だけに適用します。
17. **Advance angle [Deg]** (進み角) – 電動機の進み角。この値の増加は電動機のBEMF 0交差点に関するその指定角度での波形の生成を進めます。また、電動機によって生成されるトルクでの影響も持ちます。
このパラメータは**閉路**制御だけに適用します。
18. **Pass-through delay compensation [µs]** (通過遅延補償) – 次の扇状部タイミングに対する固定の進み時間。この値はソフトウェアやハードウェアのどの遅延に対しても補償するために次の扇状部タイミングから直接減算されます。
このパラメータは**閉路**制御だけに適用します。
19. **Delta division factor** (差除算係数) – このパラメータは追加の立往生と不具合検出の機構を制御します。0交差点の非常に早いまたは非常に遅い検出では、直前の0交差時間と現在測定された時間の間の絶対差が直前の0交差時間/差除算係数よりも大きい場合、障害状況が起動されます。差除算係数はコード効率のために2のべき乗を使って選ばれるのが理想的です。大きすぎる値は系を非常に不安定にして、障害状況を起動することによって最大加速を制限します。小さすぎる値は不具合を余り良く検出しますが、始動でのどの問題点にも出会わないでしょう。
このパラメータは**閉路**制御だけに適用します。
20. **Minimum RPM tolerance [%]** (最大RPM許容誤差) – このパラメータは制限時間と計時器用の最小RPMを制御します。始動後、系はそれが必要とするよりも僅かに遅れて0交差点を検出し、そして許容誤差が非常に小さい場合、制限時間超過事象と見做されるかもしれません。それを避けるため、与えられる許容誤差は最小RPMの%の形の下であることが必要とされます。従って最小RPMは**Target RPM(目標RPM) – Target RPM(目標RPM) × Minimum RPM tolerance(最小RPM許容誤差)**になります。
このパラメータは**閉路**制御だけに適用します。

パラメータ変更後、**Patch File**(ファイル修正)鈕を押し、その後そのファームウェアをAVR Dxに書き込んでください。

6.3. 制御動作変更

起動後、系は閉路または開路のどちらかの動作で動きます。使用者は単一コード行を構成設定することによって各動作間を選べることが自由です。

図6-2. 制御動作コード行

```
35 | /* Control mode after ramp-up */
36 | #define MOTOR_CONTROL_MODE MOTOR_CLOSED_LOOP_MODE
```

有効な任意選択はMOTOR_CLOSED_LOOP_MODEまたはMOTOR_OPEN_LOOP_MODEです。

これら2つの動作の動きが下で記述されます。

1. 閉路動作：既定の制御動作で、整流(転流)は内部比較器から受け取った0交差事象に従って起きます。有効な保護は以下です。
 - 過電流保護
 - 過電圧/低電圧保護
 - 0交差差過剰制限
 - 0交差制限時間
2. 開路動作：代替制御動作で、起動手順に対して責任のある計時器の手助けで起きます。電動機はエクセルファイルで設定したRPMで回ります。起動手順が正しく動き、回転子が傾斜の前後で後続する磁界を止めないかを試験する時に特に有用で有り得ます。この動作ではデューティサイクルを設定するのに可変抵抗器が使われますが、電動機の手助けは一定に留まります。この動作で以下の保護が有効です。
 - 過電流保護
 - 過電圧/低電圧保護

7. 結び

この応用記述は双極切り替え使うBLDC電動機の駆動法、生成する波形からの開始、必要とされるピンへのそれらの配線を記述します。

外部比較器や他の論理回路の必要がなく、唯一の例外はマイクロコントローラへ行く入力信号の条件用のいくつかの受動部品です。

最大24MIPSを提供する24MHzで走行するAVRコアは完全な制御系として電動機を駆動するのに使われるコアから独立した周辺機能(AC, ADC, TCA, TCB, CCL, USART)と一緒に複数の必要条件を統合する系の設計に於ける非常に強力な選択です。

双極駆動はPWM出力信号での同期の必要なしに、0交差点の正確な検出を手助けする綺麗なBEMFを保証します。

より良い性能のため、組み込み移動平均濾波器が外乱の場合での保護の特別な判断を追加し、電動機のRPM範囲を通して滑らかな走行を保証します。

8. 参考文献

1. AN857: 容易なブラシレスDC電動機制御動作 (DS00857)
2. AN1160: 多数決機能を使う逆EMF濾波での感知器なしBLDC制御 (DS01160)
3. AVR444: 3相ブラシレスDCモータの感知器なし制御
4. AN2522: AVR[®]マイクロコントローラのCCLを使うコアから独立したブラシレスDCファン制御 (DS00002522)

9. 改訂履歴

文書改訂	日付	注釈
A	2021年5月	初版文書公開
B	2021年6月	GitHubリンクで序説章を更新

Microchipウェブ サイト

Microchipはwww.microchip.com/で当社のウェブ サイト経由でのオンライン支援を提供します。このウェブ サイトはお客様がファイルや情報を容易に利用可能にするのに使われます。利用可能な情報のいくつかは以下を含みます。

- **製品支援** – データシートと障害情報、応用記述と試供プログラム、設計資源、使用者の手引きとハードウェア支援資料、最新ソフトウェア配布と保管されたソフトウェア
- **一般的な技術支援** – 良くある質問(FAQ)、技術支援要求、オンライン検討グループ、Microchip設計協力課程会員一覧
- **Microchipの事業** – 製品選択器と注文の手引き、最新Microchip報道発表、セミナーとイベントの一覧、Microchip営業所の一覧、代理店と代表する工場

製品変更通知サービス

Microchipの製品変更通知サービスはMicrochip製品を最新に保つのに役立ちます。加入者は指定した製品系統や興味のある開発ツールに関連する変更、更新、改訂、障害情報がある場合に必ず電子メール通知を受け取ります。

登録するにはwww.microchip.com/pcnへ行って登録指示に従ってください。

お客様支援

Microchip製品の使用者は以下のいくつかのチャネルを通して支援を受け取ることができます。

- 代理店または販売会社
- 最寄りの営業所
- 組み込み解決技術者(ESE:Embedded Solutions Engineer)
- 技術支援

お客様は支援に関してこれらの代理店、販売会社、またはESEに連絡を取るべきです。最寄りの営業所もお客様の手助けに利用できます。営業所と位置の一覧はこの資料の後ろに含まれます。

技術支援はwww.microchip.com/supportでのウェブ サイトを通して利用できます。

Microchipデバイスコード保護機能

Microchipデバイスでの以下のコード保護機能の詳細に注意してください。

- Microchip製品はそれら特定のMicrochipデータシートに含まれる仕様に合致します。
- Microchipは意図した方法と通常条件下で使われる時に、その製品系統が安全であると考えます。
- Microchipデバイスのコード保護機能を破ろうとする試みに使われる不正でおそらく違法な方法があります。当社はこれらの方法がMicrochipのデータシートに含まれた動作仕様外の方法でMicrochip製品を使うことが必要とされると確信しています。これらのコード保護機能を破ろうとする試みは、おそらく、Microchipの知的財産権に違反することなく達成することはできません。
- Microchipはそのコードの完全性について心配されている何れのお客様とも共に働きたいと思えます。
- Microchipや他のどの半導体製造業者もそのコードの安全を保証することはできません。コード保護は製品が”破ることができない”ことを当社が保証すると言うことを意味しません。コード保護は常に進化しています。Microchipは当社製品のコード保護機能を継続的に改善することを約束します。Microchipのコード保護機能を破る試みはデジタル ミレニアム著作権法に違反するかもしれません。そのような行為があなたのソフトウェアや他の著作物に不正なアクセスを許す場合、その法律下の救済のために訴権を持つかもしれません。

法的通知

この刊行物に含まれる情報はMicrochip製品を使って設計する唯一の目的のために提供されます。デバイス応用などに関する情報は皆さまの便宜のためにだけ提供され、更新によって取り換えられるかもしれません。皆さまの応用が皆さまの仕様に合致するのを保証するのは皆さまの責任です。

この情報はMicrochipによって「現状そのまま」で提供されます。Microchipは非侵害、商品性、特定目的に対する適合性の何れの黙示的保証やその条件、品質、性能に関する保証を含め、明示的にも黙示的にもその情報に関連して書面または表記された書面または黙示の如何なる表明や保証もしません。

如何なる場合においても、Microchipは情報またはその使用に関連するあらゆる種類の間接的、特別的、懲罰的、偶発的または結果的な損失、損害、費用または経費に対して責任を負わないものとします。法律で認められている最大限の範囲で、情報またはその使用に関連する全ての請求に対するMicrochipの全責任は、もしあれば、情報のためにMicrochipへ直接支払った料金を超えないものとします。生命維持や安全応用でのMicrochipデバイスの使用は完全に購入者の危険性で、購入者はそのような使用に起因する全ての損害、請求、訴訟、費用からMicrochipを擁護し、補償し、免責することに同意します。他に言及されない限り、Microchipのどの知的財産権下でも暗黙的または違う方法で許認可は譲渡されません。

商標

Microchipの名前とロゴ、Mmicrochipロゴ、Adaptec、AnyRate、AVR、AVRロゴ、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKITロゴ、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemiロゴ、MOST、MOSTロゴ、MPLAB、OptoLyzer、PacTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32ロゴ、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SSTロゴ、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron、XMEGAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、Hyper Light Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plusロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、Vite、WinPath、ZLは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certifiedロゴ、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICKtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect、and ZENAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの商標です。

SQTPは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの役務標章です。

Adaptecロゴ、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcomは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の登録商標です。

GestICは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の子会社であるMicrochip Technology Germany II GmbH & Co. KGの登録商標です。

ここで言及した以外の全ての商標はそれら各々の会社の所有物です。

© 2021年、Microchip Technology Incorporated、米国印刷、不許複製

品質管理システム

Microchipの品質管理システムに関する情報についてはwww.microchip.com/qualityを訪ねてください。

日本語© HERO 2021.

本応用記述はMicrochipのAN3998応用記述(DS00003998B-2021年5月)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には()内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。



MICROCHIP

世界的な販売とサービス

米国	亜細亜/太平洋	亜細亜/太平洋	欧州
本社 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277 技術支援: www.microchip.com/support ウェブアドレス: www.microchip.com アトランタ Duluth, GA Tel: 678-957-9614 Fax: 678-957-1455 オースチン TX Tel: 512-257-3370 ボストン Westborough, MA Tel: 774-760-0087 Fax: 774-760-0088 シカゴ Itasca, IL Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075 ダラス Addison, TX Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924 デトロイト Novi, MI Tel: 248-848-4000 ヒューストン TX Tel: 281-894-5983 インディアナポリス Noblesville, IN Tel: 317-773-8323 Fax: 317-773-5453 Tel: 317-536-2380 ロサンゼルス Mission Viejo, CA Tel: 949-462-9523 Fax: 949-462-9608 Tel: 951-273-7800 ローリー NC Tel: 919-844-7510 ニューヨーク NY Tel: 631-435-6000 サンホセ CA Tel: 408-735-9110 Tel: 408-436-4270 カナダ - トロント Tel: 905-695-1980 Fax: 905-695-2078	オーストラリア - シドニー Tel: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 Tel: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 Tel: 86-28-8665-5511 中国 - 重慶 Tel: 86-23-8980-9588 中国 - 東莞 Tel: 86-769-8702-9880 中国 - 広州 Tel: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 Tel: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特別行政区 Tel: 852-2943-5100 中国 - 南京 Tel: 86-25-8473-2460 中国 - 青島 Tel: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 Tel: 86-21-3326-8000 中国 - 瀋陽 Tel: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 Tel: 86-755-8864-2200 中国 - 蘇州 Tel: 86-186-6233-1526 中国 - 武漢 Tel: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 Tel: 86-29-8833-7252 中国 - 廈門 Tel: 86-592-2388138 中国 - 珠海 Tel: 86-756-3210040	インド - ハンガロール Tel: 91-80-3090-4444 インド - ニューデリー Tel: 91-11-4160-8631 インド - フネー Tel: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 Tel: 81-6-6152-7160 日本 - 東京 Tel: 81-3-6880-3770 韓国 - 大邱 Tel: 82-53-744-4301 韓国 - ソウル Tel: 82-2-554-7200 マレーシア - クアラルンプール Tel: 60-3-7651-7906 マレーシア - ペナン Tel: 60-4-227-8870 フィリピン - マニラ Tel: 63-2-634-9065 シンガポール Tel: 65-6334-8870 台湾 - 新竹 Tel: 886-3-577-8366 台湾 - 高雄 Tel: 886-7-213-7830 台湾 - 台北 Tel: 886-2-2508-8600 タイ - バンコク Tel: 66-2-694-1351 ベトナム - ホーチミン Tel: 84-28-5448-2100	オーストラリア - ウェルズ Tel: 43-7242-2244-39 Fax: 43-7242-2244-393 デンマーク - コペンハーゲン Tel: 45-4485-5910 Fax: 45-4485-2829 フィンランド - エスポー Tel: 358-9-4520-820 フランス - パリ Tel: 33-1-69-53-63-20 Fax: 33-1-69-30-90-79 ドイツ - ガルヒング Tel: 49-8931-9700 ドイツ - ハーン Tel: 49-2129-3766400 ドイツ - ハイムブロン Tel: 49-7131-72400 ドイツ - カールスルーエ Tel: 49-721-625370 ドイツ - ミュンヘン Tel: 49-89-627-144-0 Fax: 49-89-627-144-44 ドイツ - ローゼンハイム Tel: 49-8031-354-560 イスラエル - ラーナナ Tel: 972-9-744-7705 イタリア - ミラノ Tel: 39-0331-742611 Fax: 39-0331-466781 イタリア - パドバ Tel: 39-049-7625286 オランダ - デルフト Tel: 31-416-690399 Fax: 31-416-690340 ノルウェー - トロンハイム Tel: 47-72884388 ポーランド - ワルシャワ Tel: 48-22-3325737 ルーマニア - ブカレスト Tel: 40-21-407-87-50 スペイン - マドリッド Tel: 34-91-708-08-90 Fax: 34-91-708-08-91 スウェーデン - イェテボリ Tel: 46-31-704-60-40 スウェーデン - ストックホルム Tel: 46-8-5090-4654 イギリス - ウォーキングム Tel: 44-118-921-5800 Fax: 44-118-921-5820