注意: この日本語版文書は参考資料としてご利用ください。
最新情報は必ずオリジナルの英語版をご参照願います。

MICROCHIP

AN3998

AVR®マイクロコントローラ用のセンサレスBLDC(ブラシレスDC)モータの制御

はじめに

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

本書では、AVR® DAおよびAVR DBファミリのAVR128DA48またはAVR128DB48マイクロコントローラをベースにしたPIM(プラグイン モジュール)を使ったセンサレスBLDC(ブラシレスDC)モータの制御方法について説明します。

本書の前半では、ソフトウェア実装の根幹となるモータ制御の理論に焦点を当てます。センサ付きおよびセンサレス制御方式、台形整流の詳細等、そのモータの駆動方法に関する重要な情報について説明します。

後半では、システムのソフトウェアとハードウェアの実装について説明します。

サンプル アプリケーションでは、dsPICDEM™ MCLV-2開発ボード(低電圧モータ制御用)に接続したAVR128DA48またはAVR128DB48ベースのPIMを使います。MCLV-2ボードは回転速度を調整するポテンショメータを備え、PIMには入力保護回路とBEMF(逆起電力)回路があります。

このシステムは、用いた駆動方式の特性から回生ブレーキを利用できます。

モータの駆動波形は、マイクロコントローラの周辺モジュールが持つハードウェア機能を使ってコアとは独立して生成されます。

また、このアプリケーションではストール検出、誤入力検出、両方向の過電流保護等の保護メカニズムを複数採用しています。

ファームウェアを適切に調整する事で様々なBLDCモータを駆動できます。本書の最後に、各種モータで必要なパラメータを調整する際のガイドラインを記載しています。

BLDCモータはコードレス電動工具、コンピュータ、ハードディスク ドライブ、マルチメディア機器、小型電子機器の冷却ファン、電気自動車等の幅広いアプリケーションで使われており、電気関連ソリューションの未来をになう成長市場です。従来は16ビット以上のマイクロコントローラを使ってこのデバイスを作成していましたが、本書のソリューションでは8ビット マイクロコントローラを使って対費用効果の高いモータ ドライバを作成できます。

GitHub上のモータ制御PIMコードを見る
クリックしてリポジトリを閲覧

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

目次

はじめに 1

1. 概要 3

2. 対応デバイス 4

3. モータ制御の理論 5

4. ファームウェアの実装 14

5. PIM(プラグイン モジュール) ボードの説明 24

6. 調整 34

7. まとめ 37

8. 参考資料 38

9. 改訂履歴 39

Microchip社のウェブサイト 40

製品変更通知サービス 40

お客様サポート 40

Microchip社のデバイスコード保護機能 40

法律上の注意点 41

商標 41

品質管理システム 42

各国の営業所とサービス 43

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

1. 概要

本書では、BLDCモータの駆動に必要なモータ制御の理論、センサ付きモータ制御とセンサレスモータ制御の比較、電源段の一般的な実装、変調方式、カスタムPIMの詳細について説明します。

さらに、サンプル アプリケーションの焦点である双極スイッチングについて詳しく紹介します。

ロータの位置を得るために、モータの仮想中点で構成される可変参照電圧でコンパレータを使うゼロクロス点検出方式について説明します。

アラインメント ルーチンの後、モータは初期位置で始動します。これにより、始動時にモータは生成された開ループ用駆動波形に追従します。

コンパイル時に、モータの動作モードを開ループにするか閉ループにするかを選択できます。

MCLV-2ボードのポテンショメータは、波形タイマのデューティ参照値の計算に使われるADCの読み取り値を提供します。この読み取りは、電流と共にソフトウェアのモータロジック ドライブから非同期で行われます。この部分がメインループで動作し、モータ制御が割り込みで動作する事で応答速度を可能な限り高速化します。

本書の最後に、ユーザが希望する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際の概要を記載しています。

本書のサンプル アプリケーションでは以下の周辺モジュールを使います。

- AC(アナログ コンパレータ)
- ADC (A/Dコンバータ)
- PORT (I/Oピンコントローラ)
- TCA(タイプAタイマ/カウンタ)
- TCB(タイプBタイマ/カウンタ)
- TCD(タイプDタイマ/カウンタ)
- CCL(構成可能なカスタムロジック)
- 参照電圧(V_{REF})
- USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)

前提条件

1. ソフトウェア:
   - Microchip Studio 7 IDE(統合開発環境)、AVR DXデバイスファミリ パック(DFP 1.7.85以降)付き
2. ハードウェア:
   - AVR128DA48モータ制御PIMまたはAVR128DB48モータ制御PIM、内蔵オペアンプ コンフィグレーション ボード付き
   - dsPICDEM™ MCLV-2開発ボード (低電圧モータ制御用)
   - AC300020 - 24 V 3相ブラシレスDCモータ
   - AC002013 - 24 V電源
   - MPLAB® PICkit™ 4インサーキット デバッガ

MCLV-2開発ボードの目的は、ブラシレスモータまたは永久磁石式同期モータをセンサ付きまたはセンサレス動作で制御する事です。このデモでは、AVR128DA48またはAVR128DB48モータ制御PIMとこの開発ボードを組み合わせてセンサレス動作でブラシレスモータを駆動します。この開発ボードには、3相用のドライバ、フィードバック信号の計測手段、内蔵オペアンプが備わっています。AVR128DB48 PIMでは内蔵オペアンプ信号の経路が異なるため、追加のコンフィグレーション ボードを使います。

このデモでは、プログラミング インターフェイスやシリアル インターフェイスなどの MCLV-2 ボード上の機能を使用して、モータの動作パラメータに関する情報を受け取ります。さらに、ボードにはLED、ボタン、ポテンショメータが搭載されていて、アクティブなPWM出力の表示、モータの方向設定、モータの始動と停止、モータの速度変更を行うユーザ インターフェイスを提供します。

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

2. 対応デバイス

以下に、本書の内容に対応するデバイスを記載します。下図に、ピン数とメモリ容量に基づくファミリデバイスのラインアップを示します。

- 縦方向の上位デバイス (ピン数が同じでメモリ容量が大きなデバイス)へ移行する場合、機能が増えてもピン互換であるためコードを変更する必要はありません。
- 横方向の下位デバイス (メモリ容量が同じで少ピンのデバイス)へ移行する場合、使えなくなる機能があります。
- フラッシュメモリ容量が異なるデバイスでは、通常SRAMとEEPROMの容量も異なります。

図2-1. AVR® DAファミリの概要

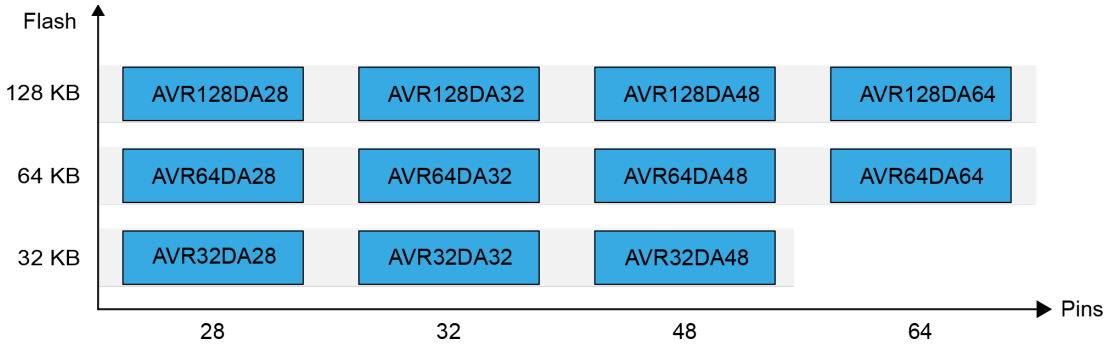
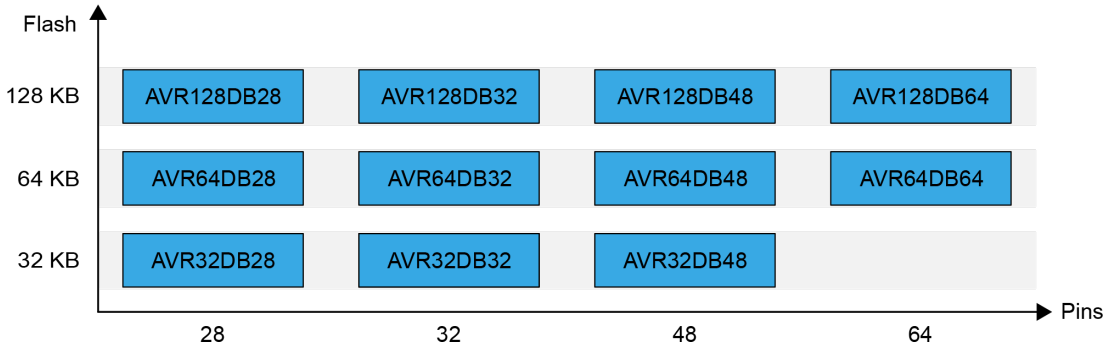


図2-2. AVR® DBファミリの概要



© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

3. モータ制御の理論

ここではモータ制御の概念、そしてその概念がソフトウェアとハードウェアの実装にどのように適用されるかについて説明します。

3.1 センサ付き制御とセンサレス制御の比較

BLDC(ブラシレスDC)モータはコンパクトな同期モータで、高効率で保守が不要です。ブラシ付きDCモータと比べて大きなメリットがあり、非常に厳しい基準が要求される民生および工業用途に適しています。

ブラシ付きDCモータは機械的に整流されます。ブラシと整流子を備えており、ロータの位置に従って整流子からコイルに電圧がかかるようになっています。

ブラシ付きDCモータとは異なり、BLDCモータの整流はロータの位置に応じて行う必要があるため、ロータ位置を知る必要があります。

ロータの位置を特定するには、センサ付きまたはセンサレス アルゴリズムが使えます。

3.1.1 センサ付き制御

1つの方法はステータの外側にあるセンサを使った制御です。このセンサがロータの磁石に反応して位置を特定するための信号を送ります。通常、3つのホール効果センサ相互に60度の位相差を持たせます。

センサを使う事の利点は、各ホール効果センサの状態を知る事でシステム電源投入時に速度がゼロであってもロータの位置が分かる事です。

センサを使う事の主な欠点は、モータのコストが上がって構造が複雑になり、補助電源も必要になる事です。

3.1.2 センサレス制御

もう1つの方法は、制御ボードで少数の受動素子しか必要ないセンサレス制御です。

この制御方法は、BEMF(逆起電力)というロータの磁石の動きによって生じる開放相端子の電圧を検出する事で動作します。BEMFは、ロータの現在位置に関する情報をマイクロコントローラに送ります。

1つのコイルで誘起される電圧はロータの速度に比例するため、極低速時のBEMFの振幅は非常に小さく、ノイズが多くてフィルタ処理が困難です。そのため、マイクロコントローラが発生させた磁場にロータが非同期で追従する開ループ始動手順があります。BEMFの振幅が検出可能になるまで速度が継続的に上がります。

センサレス制御の利点は、センサ付きモータをセンサレスモードで駆動し、可能であればフェイルセーフな制御方法として使える事です。また、モータの固有BEMF以外の外部入力に依存しないため、信頼性も向上します。

ホール効果センサがノイズのない論理信号を提供するセンサ付き制御とは異なり、センサレス制御ではモータの構造や電源ノイズ等の要因によって信号のフィルタ処理やコンディショニングが必要です。

BEMFフィルタ処理によりモータ速度の急激な変化を正確に検出できず、システムのロックが解除される可能性があります。センサ付き制御では、モータの動作状態に関係なくホール効果センサの信号が得られるため、この問題は発生しません。

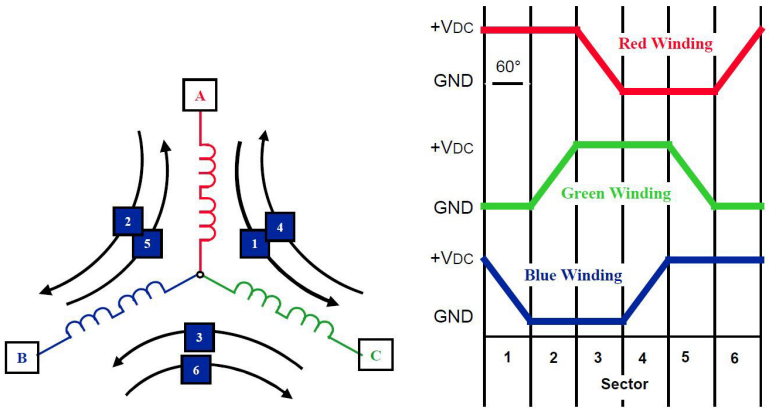
3.2 6ステップ(台形)整流

台形制御は3相(ここではA、B、C)で構成されます。この3相のうち2相を駆動して3相目をフロート(開放)状態にする事で、動いているロータから発生するBEMFのゼロクロスを検出できるようにしています。

各ステップ (セクタ)は360°(電気的な1回転)のうち60°に相当します。

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

図3-1. 理想的な台形波形



ステップ整流は以下のように実行されます。

ステップ1:	ステップ4
• 赤い巻き線は「正」の電流方向で駆動 • 緑の巻き線は「負」の電流方向で駆動 • 青い巻線は非駆動	• 緑の巻き線は「正」の電流方向で駆動 • 赤い巻線は「負」の電流方向で駆動 • 青い巻線は非駆動
ステップ2:	ステップ5:
• 赤い巻き線は「正」の電流方向で駆動 • 青い巻き線は「負」の電流方向で駆動 • 緑の巻線は非駆動	• 青い巻き線は「正」の電流方向で駆動 • 赤い巻線は「負」の電流方向で駆動 • 緑の巻線は非駆動
ステップ3:	ステップ6:
• 緑の巻き線は「正」の電流方向で駆動 • 青い巻き線は「負」の電流方向で駆動 • 赤い巻線は非駆動	• 青い巻き線は「正」の電流方向で駆動 • 緑の巻き線は「負」の電流方向で駆動 • 赤い巻線は非駆動

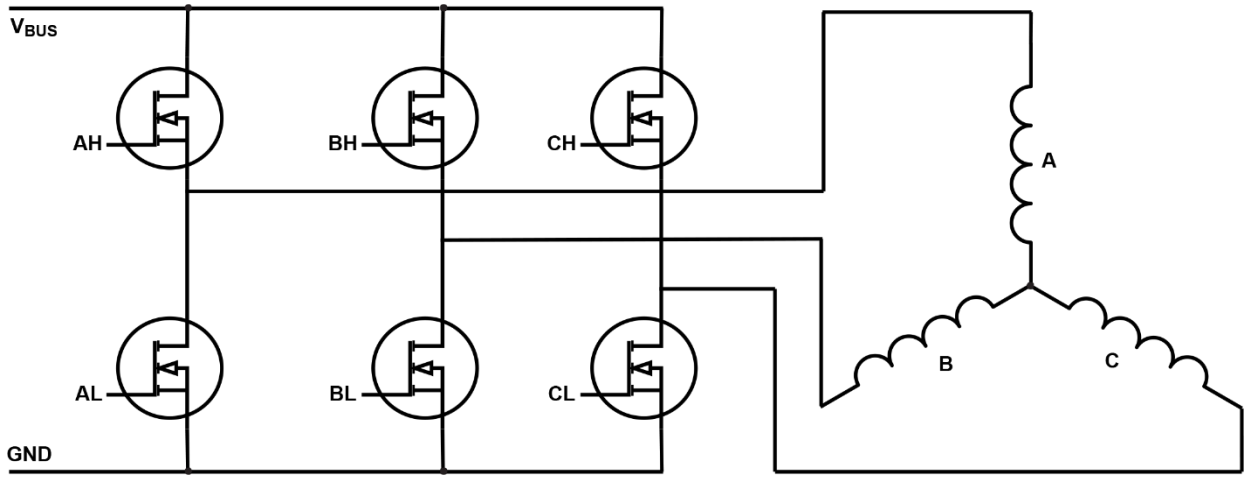
速度が一定か速度変動が小さい場合、2つの整流間の周期は等しくなります。これは閉ループでモータを制御するための推定値です。

この実装では、メモリリソースと処理能力がきわめて少なく済み、8ビット マイクロコントローラに簡単に実装できる事から、台形整流を採用しています。

3.3 電源段

電源段を構成しているのは、各相を電源電圧またはグランドに接続できる3つのハーフブリッジから成るインバータです。スイッチング素子は通常、低電圧アプリケーション用にはMOSFET、高電圧アプリケーション用にはIGBTです。

図3-2. 標準的な電源段回路



AH、BH、CHはマイクロコントローラからのハイサイドのコマンド信号、AL、BL、CLはローサイドの信号を表します。

パワートランジスタに加え、MOSFET/IGBTドライバを使って良好な立ち上がりおよび立ち下がり時間を確保し、ハイサイド/ローサイド トランジスタに必要なゲート電圧を供給します。

ハイサイドおよびローサイド コマンド信号の間にデッドタイムを設ける事で貫通電流を防ぐ組み合わせロジック回路を採用しています。

このデッドタイムにより、同じブランチのMOSFETまたはIGBTが完全にOFFになり、電流が同時に流れることはありません。

3.4 変調方式

BLDCモータの速度を制御するには、モータの各相に印加される電圧を調整する必要があります。これはブラシ付きDCモータと同じ方式、つまりPWM(パルス幅変調)方式で電圧を変調させる事で簡単に実現できます。これにより、モータ速度はPWM信号のデューティ サイクルに正比例します。

以下では、2つのスイッチング方式を長所と短所と共に紹介します。

3.4.1 単極スイッチング

単極スイッチングでは、1回の台形ステップで2つのトランジスタに通電する必要があります。

ローサイドのトランジスタは常に導通し、ハイサイドのトランジスタはPWM信号で駆動されます。ほとんどのアプリケーションでは、MOSFETドライバがハイサイド トランジスタ コマンドを処理します。MOSFETドライバには、ローサイドが導通している時に充電されるブートストラップ コンデンサがあります。ローサイドでPWMを適用する方式を採用した場合、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ます。その結果、デューティ サイクルの割合が低い時は充電量が少なくなり、トランジスタの$R_{DS\ (on)}$が増加してトータル効率の低下またはドライバICチップの低電圧ロックアウトが発生します。

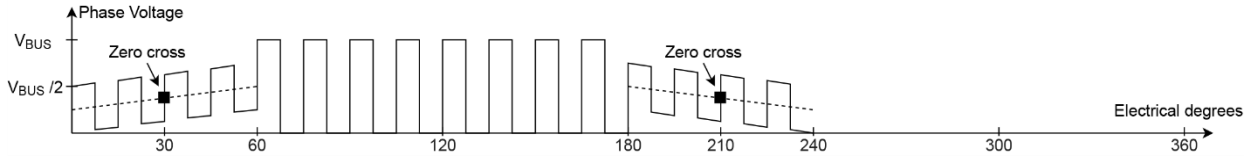
センサレス制御では、この方式には次のような複数の課題があります。

- 全コイル間の磁気結合によってPWMによる波形チョッピングの影響はBEMFの生じる開放相端子でも観測されます。
  そのため、特定のタイミングでBEMFを「サンプリング」する同期方式が必要です。このサンプリング時間として理想的なのは、BEMFが安定して変動しないPWM-Highパルスの中央です。
- 波形にノイズが重なるとフィルタ処理が難しくなり、誤ったタイミングでゼロクロスが生じます。これにより効率が低下して音響ノイズと電気ノイズが増加します。
  この方式では、従来のRCフィルタ方式は低速時には高い値が必要なため非効率で、高速時には大きな遅延が発生します。

単極スイッチングでよく見られる波形を図3-3に示します。

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

図3-3. 単極スイッチングの相電圧(50%のデューティ サイクル)



これは、大半のシンプルな設計で使われる典型的なシナリオです。

3.4.2 双極スイッチング

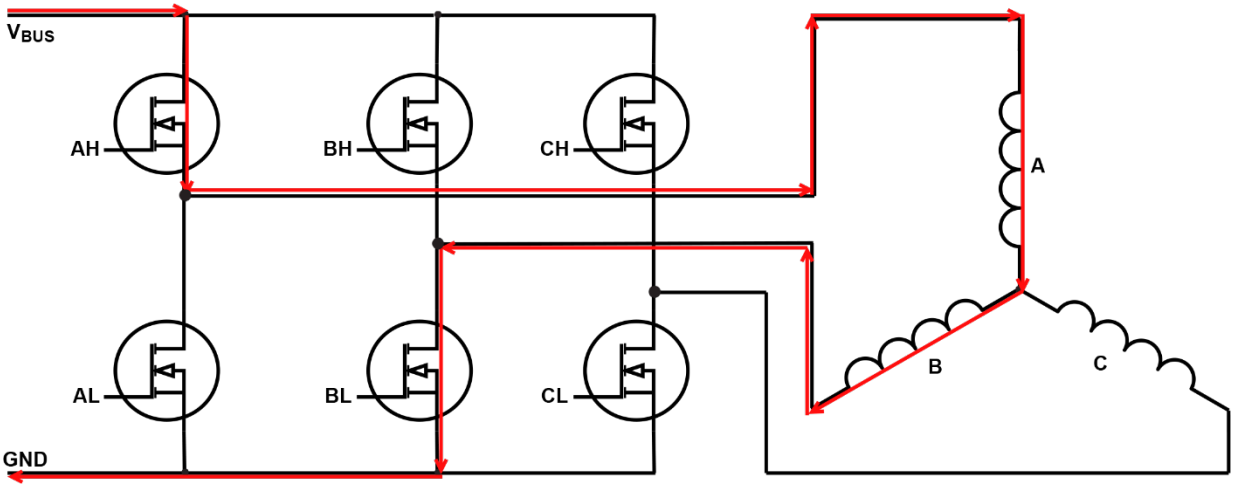
単極スイッチングとは異なり、双極スイッチングでは1回の台形ステップで4つのトランジスタに通電する必要があります。

単極スイッチングとは対照的に、双極スイッチングの場合、通電する他の2つのトランジスタは各ステップを特徴付けるトランジスタに対して相補的です。

この挙動は以下の状況で表せます。

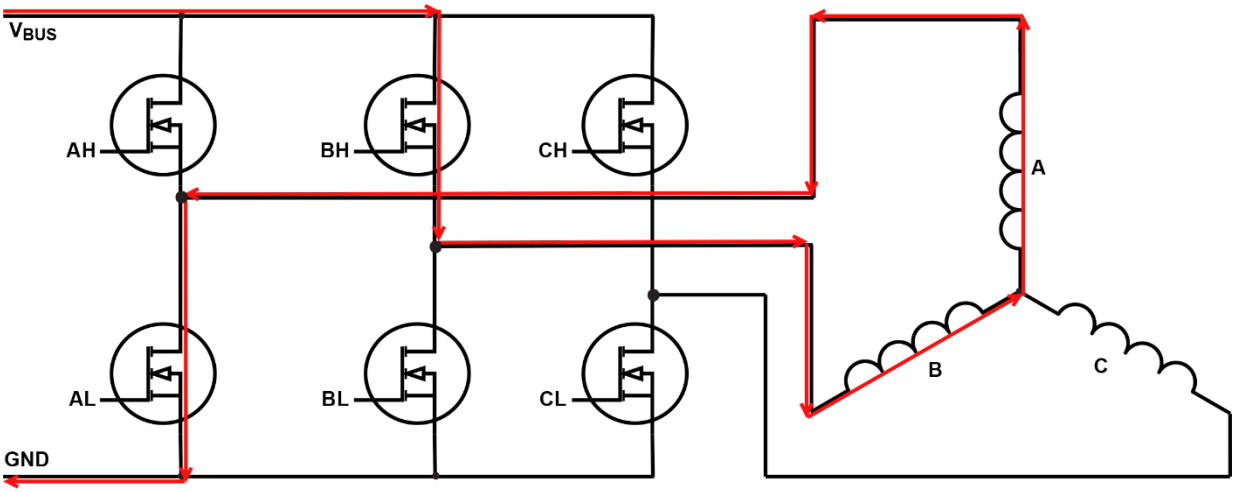
順状態はA相がHigh、B相がLowに固定されている事を示すAH-BLです。これを実現するには、A相ハーフブリッジのハイサイド トランジスタとB相のローサイド トランジスタを通電します。

図3-4. AH-BL状態の電流



AH-BLの相補的状態はAL-BHで、電流は以下のように流れます。図3-5を参照してください。

図3-5. AL-BH状態の電流



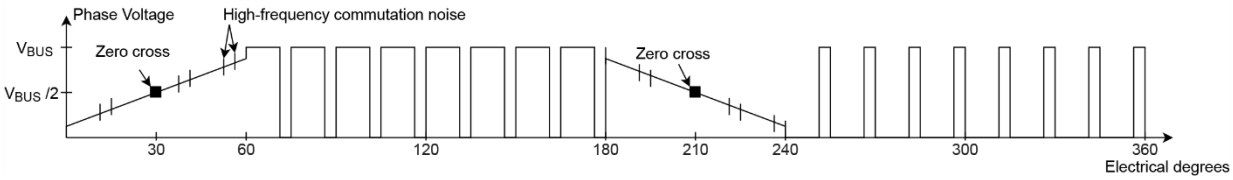
単極駆動では0%のデューティ サイクルでゼロ速度である事を考えると、双極駆動の場合、ゼロ速度は50%のデューティ サイクルです。この時、相補的状態の時間は順状態と同じです。

この方式には、非常にクリーンなBEMFという利点があります。というのは、開放相端子で誘起される全ての電圧が相補的状態によって相殺されるため、高周波スパイクのみを含む波形が得られ、非常に小さな時定数のRCフィルタを使ってフィルタ処理できるからです。

この方式の主な欠点は、モータが発する電磁ノイズと音響ノイズが大きくなる事、そしてトランジスタのペアがスイッチングにもう1つ必要になるためにシステム全体の損失が増える事です。

1つの相の電圧を図3-6に示します。

図3-6. 双極スイッチングの相電圧(75%のデューティ サイクル)



順状態と相補的状態の間を移行する時に高周波スパイクが出現します。この現象は、整流域の近くでスパイクの振幅が高くなる低インダクタンス モータで見られます。

図3-7. 低インダクタンス モータのBEMFノイズ

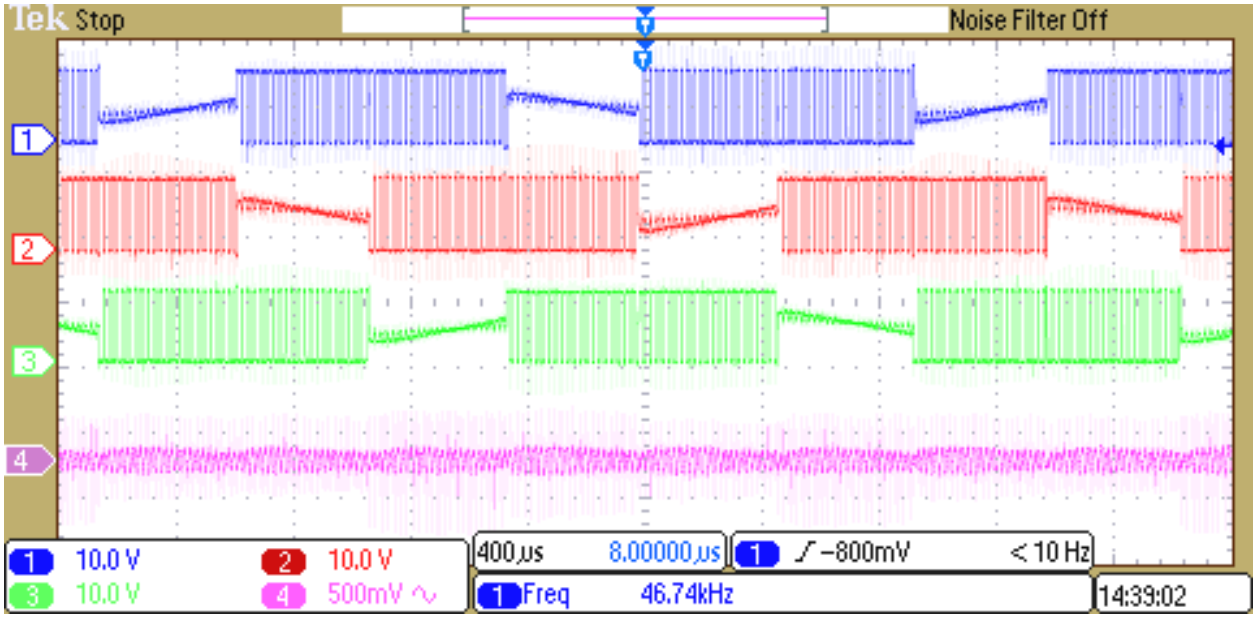
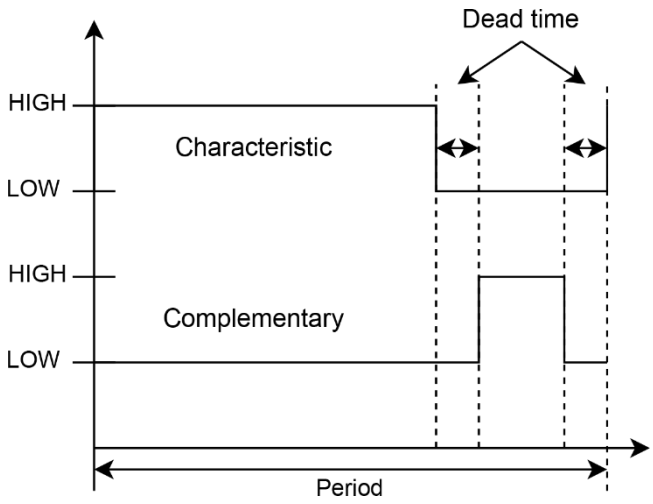


図3-7では、最初の3つの波形がモータの3相のPWM信号を表し、4番目の波形がトランジスタを通る電流を検出したものを表します。

貫通電流を防ぐため、ドライバのコマンド信号の間にデッドタイムが設けられます。

図3-8. デッドタイム挿入



約42 nsのデッドタイム(PWMタイマの1クロックサイクル)を追加した結果を図3-9に示します。ただし、パワーMOSFET/IGBTのゲート静電容量が大きい場合、デッドタイムを延ばす事を推奨します。

図3-9. モータ波形をクローズアップした図

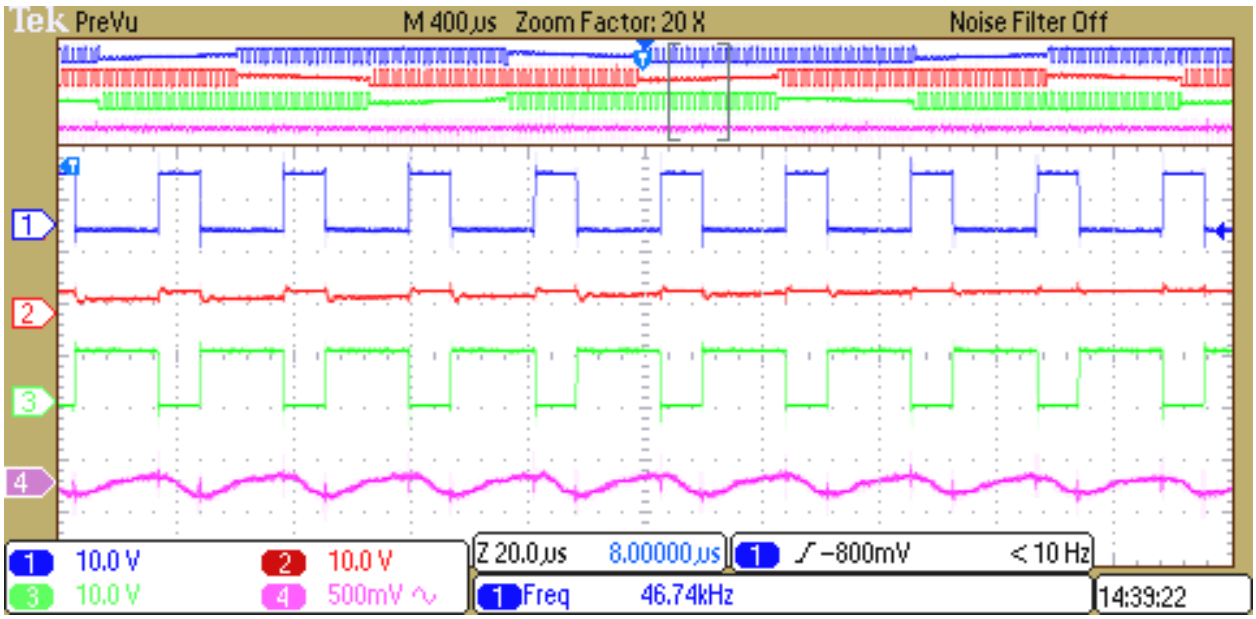


図3-9では、最初の3つの波形が3相のPWM信号を表し、4番目の波形がトランジスタを通る電流を検出したものです。電流波形の小さなスパイクはトランジスタのスイッチングに対応したもので、わずかな貫通電流を表しています。デッドタイムを追加しなかった場合、電流が大幅に上昇してトランジスタが加熱し、焼損してしまうでしょう。

スイッチング ノイズ

単極スイッチングと同様に、双極スイッチングにも特有の問題があります。整流時、一定の負荷がモータにかかると減磁シーケンスが発生します。これがゼロクロスの検出に影響し、誤入力を引き起こした結果、モータが同期しなくなる可能性があります。

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

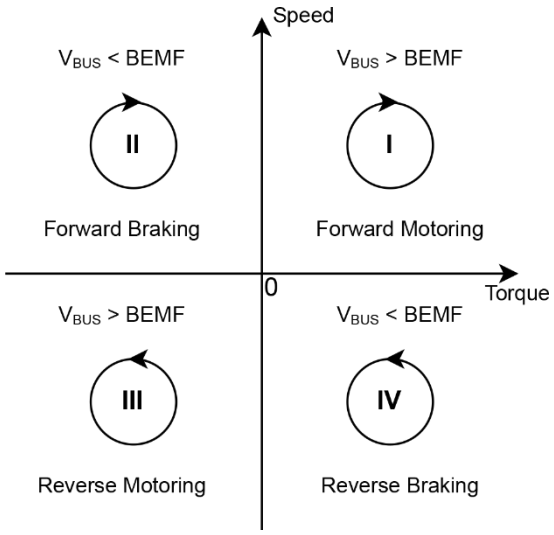
減磁シーケンスがほぼ30°の電気角に達する可能性もあるため、これは特に厄介な問題になりかねません。ゼロクロス点を検出できる領域が限られ、場合によっては無くなってしまうためです。

この挙動に対する解決策は、ゼロクロスを完全に無視するブランキング時間を追加する事です。このパラメータは制御アルゴリズムに動的に設定され、rpmの全領域で自己適応します。

回生ブレーキ

ブラシレスモータの動作は4つの領域に分ける事ができます。この各領域を「象限」と呼びます。それぞれを図3-10で説明します。

図3-10. 4象限の動作



本書では第1象限と第2象限のみが対象です。特に制御アルゴリズムの介入がなくてもモータはどちらかで動作できます。

第1象限では、モータがバスから電流を引き込んでフリーランニング状態にあるか、モータに負荷がかかっています。計測したロータの速度は設定速度以下です。

もう一方の第2象限では、システムの慣性またはその他の外力によりモータの設定速度が計測速度を下回っています。

2象限の動作はデューティ サイクルに直接関連し、これにより次の式で求められる特定のrpmが課されます。

$RPM = K_V \times U$ (K_Vはモータのパラメータ、Uはコイルに印加した電圧)
以下の概念: RPM_{SET}と$RPM_{MEASURED}$は、モータの現在のrpmと任意の時点の設定rpmに関する情報を提供します。

従ってrpmの差は次の式で表す必要があります。

$\Delta RPM = RPMSET - RPMMEASURED$

ΔRPMがゼロを上回る場合、モータは第1象限にあり、電源から電流を引き込んでいます。ΔRPMが0未満の場合、

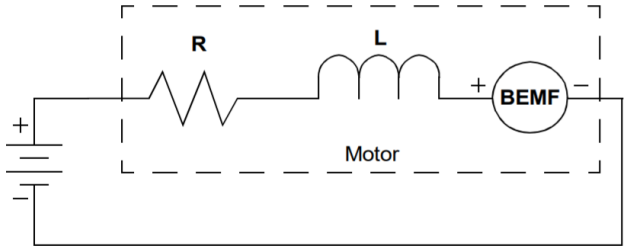
モータは第2象限にあり、電源に電流を戻しています。

これはモータの挙動に関するおおよその目安であり、摩擦損失または負荷等の変動要因は考慮していません。

第2象限では、システムは昇圧型コンバータのように動作します。生成できる最大電流は、モータのパラメータ、前述のΔRPM、バッテリのESRによって決まります。

以下のようにモータの等価回路を得る事ができます。

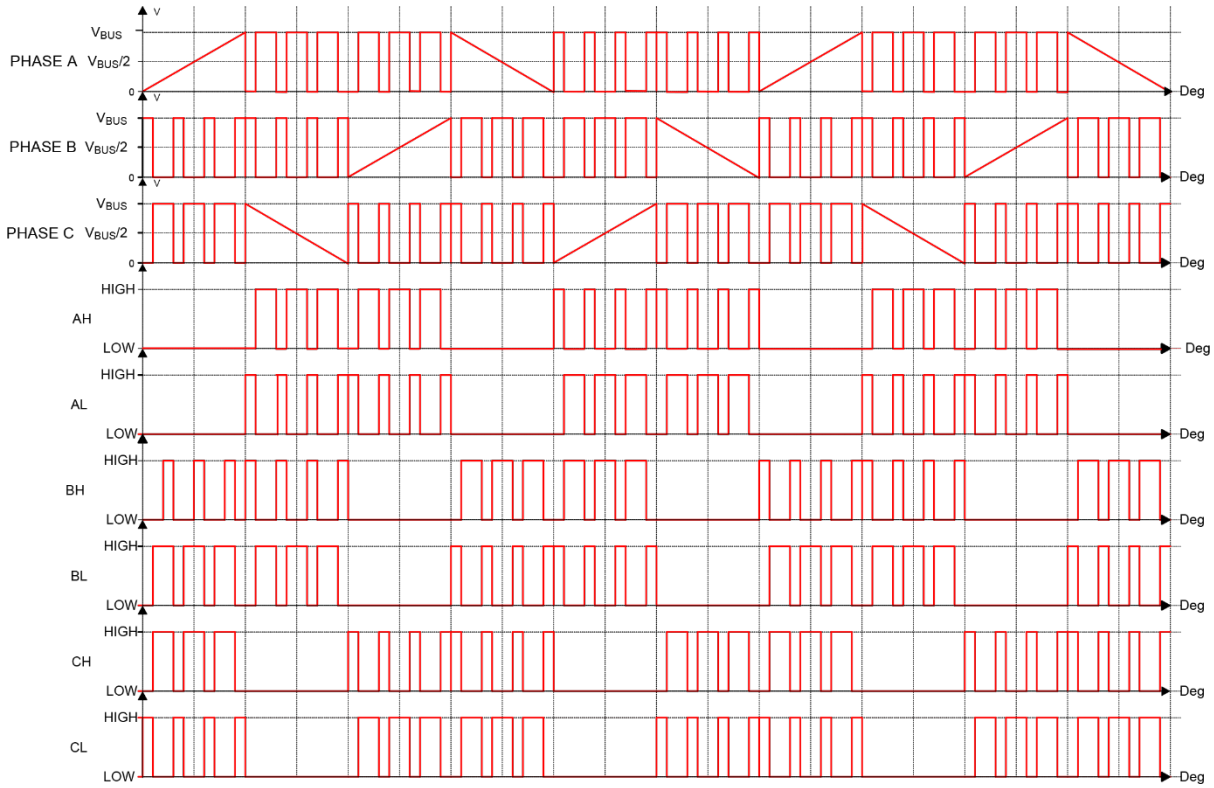
図3-11. モータの等価回路



コイル抵抗とインダクタンスはrpm範囲全体で静的ですが、BEMFは回転数に正比例します。 $BEMF = RPM/Kv$. BEMFの振幅は電源電圧にPWMデューティ係数を乗算した値です(双極動作の場合、50%のデューティは0 Vを意味します)。モータに負荷がかかっていない場合、BEMFの振幅は最大デューティ サイクルで電源電圧に近づきます。

システムと電源を過電圧状態から保護するために、バスの電圧を監視する追加回路が必要です。

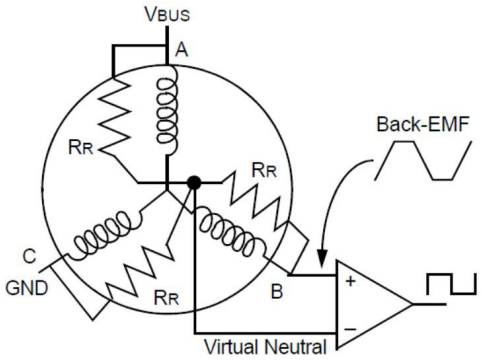
図3-12. 双極スイッチングの相電圧とコマンド信号



3.5 ゼロクロス点の検出

この実装では、全相電圧を合計した可変参照値を使ってコンパレータでゼロクロス点を計測する方法を採用しました。

図3-13. コンパレータを使ったゼロクロス点の検出

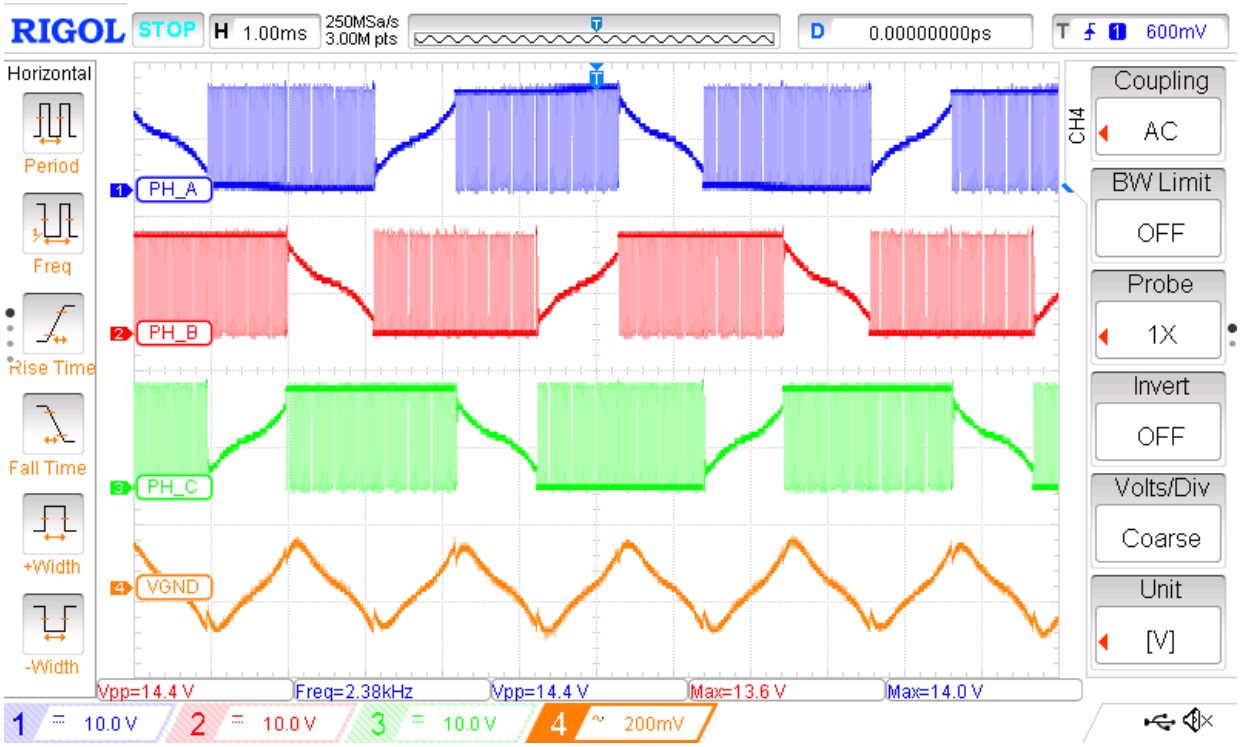


中点電圧は$V_n = \frac{BEMF\ A + BEMF\ B + BEMF\ C}{3}$という式で表す事ができます。$V_n$は仮想中点電圧、*BEMF A*はA相のBEMF電圧、*BEMF B*はB相のBEMF、*BEMF C*はC相の電圧です。

コイル インピーダンスの非対称性により、仮想中点信号は一定ではなく駆動サイクルに応じて変化します。整流点の位相シフトを避けるため、仮想中点に大きなフィルタ処理をかけないでください。低RC時定数のローパスフィルタで高周波ノイズのみを抑える必要があります。

仮想グランドの不規則性を図3-14に示します。最初の3つの波形は3相それぞれのPWM信号を表し、4番目の波形は仮想グランドです。

図3-14. 仮想グランドの波形



4. ファームウェアの実装

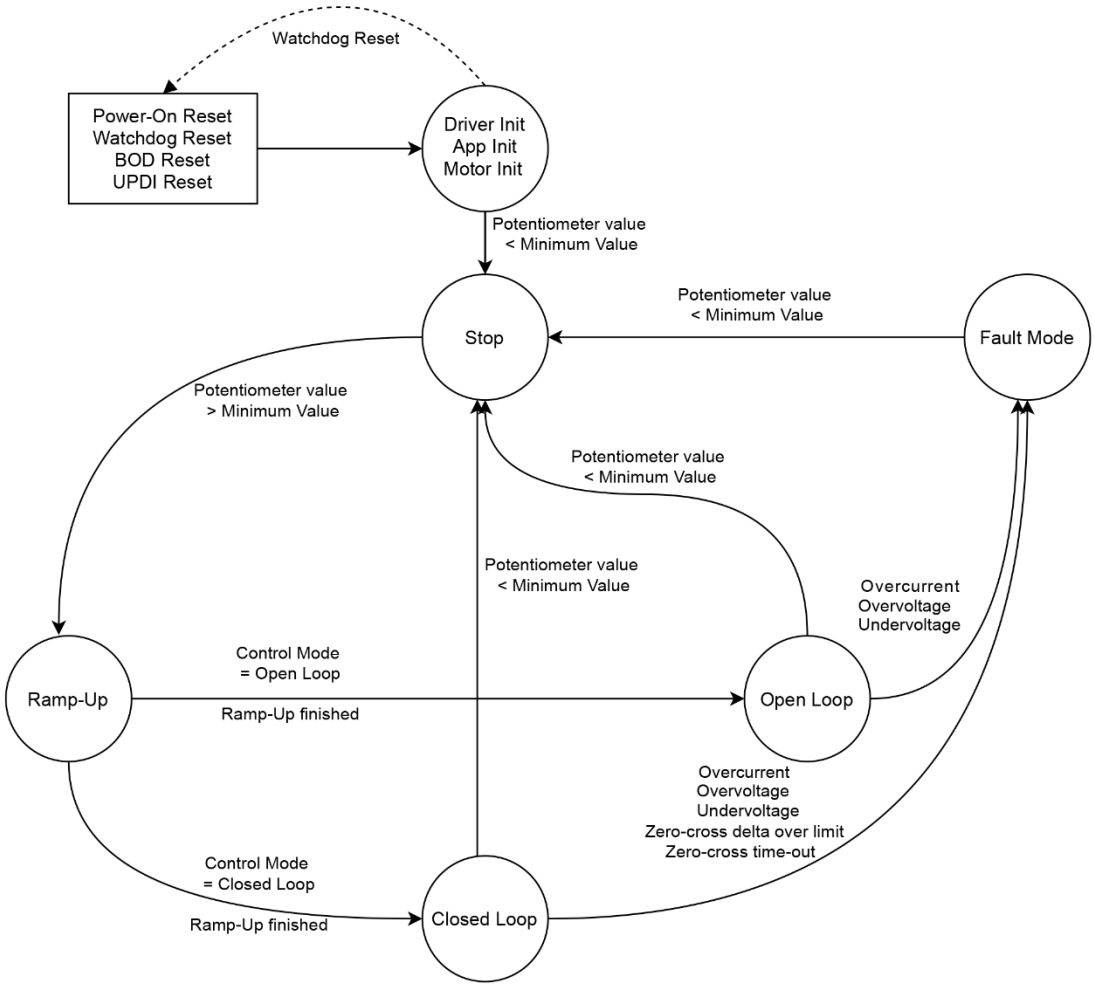
以下では、内蔵AVRモジュールを使って特定のタスクを達成する方法を紹介し、ファームウェアがモータ制御システムとしてどのように機能するかについて説明します。

4.1 システム概要

システム ステートマシン

ファームウェアはシステムの動作を制御するステートマシンに基づいています。ステートマシンはフォルト処理、リセット情報を提供し、UART経由で送信されたエラーメッセージを利用したデバッグを可能にします。

図4-1. システム制御ステートマシン



システムの電源投入時、システム制御状態がDriver Init、App Init状態に設定されます。これはリセット後のシステムの既定値状態です。リセット要因を特定するために、具体的なイベントをユーザに通知するメッセージが出力されます。システムがすぐに起動しないようにポテンショメータの値が事前に確認されます(例えば、モータがフルスピードで動作している時に外部のリセットが発生した場合、システムはすぐに起動せずにモータと電源段を保護します)。この条件を満たさない場合、ウォッチドッグが起動してマイクロコントローラをリセットします。

その後、モータはStop状態に移行します。ポテンショメータ値が設定したしきい値を超えて増加した場合、ロータがアラインメントされてシステム状態がRamp-Upに設定されます。ここではロータの位置を把握せずにソフトウェアで定義した速度までモータを加速させます。

ランプアップ シーケンスを終了すると、システムはOpen LoopモードまたはClosed LoopモードのDefined Control状態になります。

Open Loopの場合、モータは動作しますが、マイクロコントローラはそのロータ位置に関する情報を持っていません。モータの速度はポテンショメータを使って調整できます。速度の値が設定したしきい値を下回ると、モータが停止してシステムがStop状態になります。過電流を検出した場合、システムはError Handling状態へ切り換わります。

Closed Loopの場合、マイクロコントローラが受信したロータ位置に関するフィードバックに基づいてモータが動作します。モータの速度は一定で、デューティ サイクルのみポテンショメータを使って調整できます。速度の値が設定したしきい値を下回ると、モータが停止してシステムがStop状態になります。

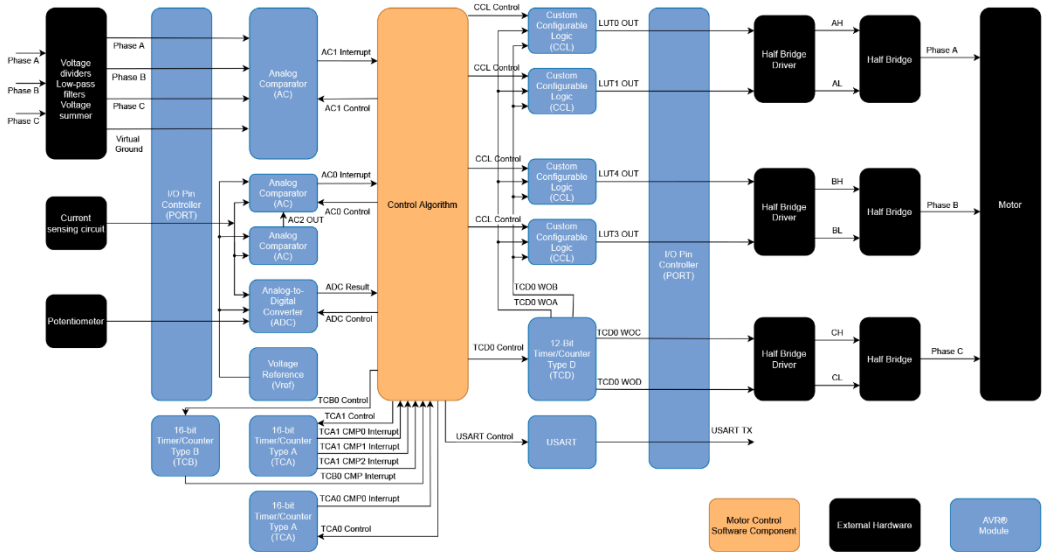
過電流に加え、ゼロクロスデルタ リミット超過、ゼロクロス タイムアウト、低電圧、過電圧が原因でシステムはError Handling状態になります。

システムがError状態になった場合、リセットする唯一の方法はポテンショメータを設定しきい値以下にする事です。それによりシステムはStop状態に戻ります。

使用デバイス モジュールと信号の概要

図4-2に、ハードウェア、マイクロコントローラ、ソフトウェア モジュールの関係を示します。「control」という用語は、周辺モジュールのレジスタに何らかの変更があった事を通知する場合に使っています。

図4-2. システム モジュールの概要



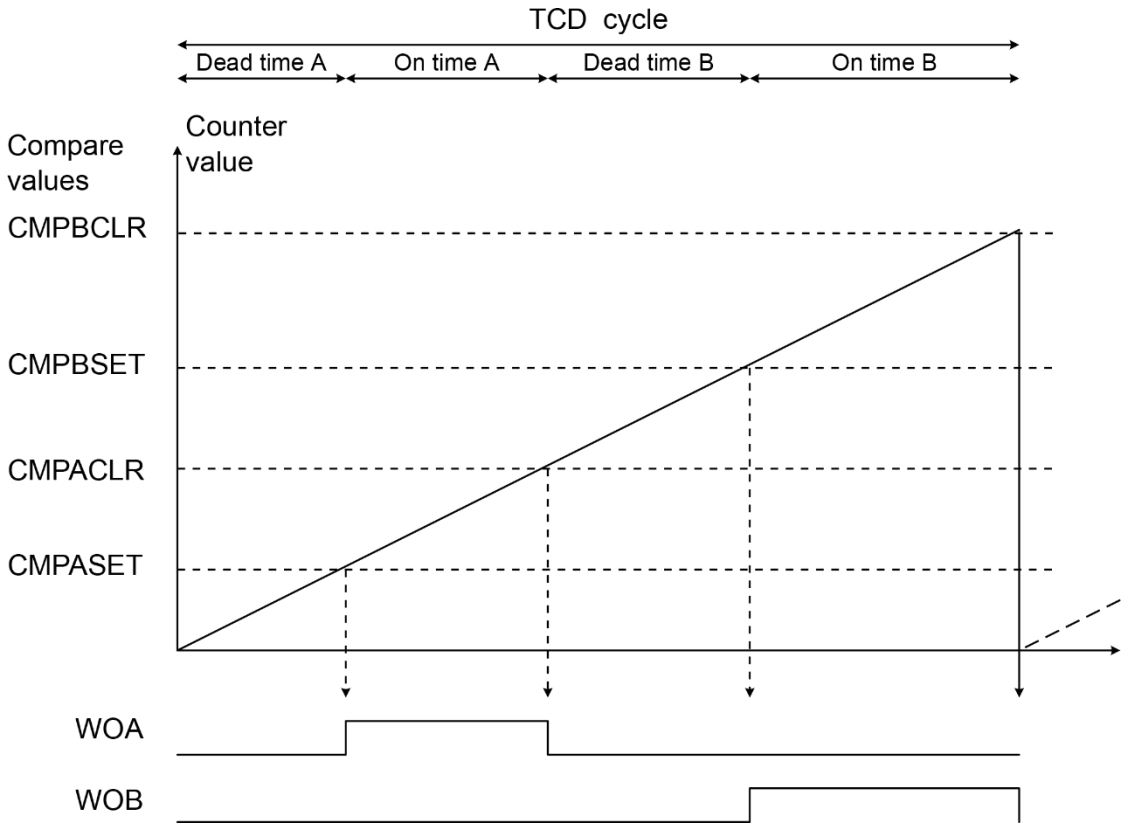
この実装では上記の双極スイッチングを使います。ゼロクロスは内部コンパレータを使って検出します。

4.2 PWM生成

ハーフブリッジ ドライバ入力を制御するPWM信号の生成にはTCD(タイプDタイマ/カウンタ) モジュールを使います。

タイマは1ランプモードで構成されます。図4-3にその機能を示します。

図4-3. TCD 1ランプモードの波形



1ランプモードの場合、TCDサイクルの周期は以下の通りです。$T_{TCD_cycle} = \frac{(CMPBCLR + 1)}{f_{CLK_TCD_CNT}}$

例えば、入力クロック = 24 MHz、プリスケーラ = 1:1、CMPBCLR値 = 512の場合、周期は21.375 µs(周波数では約46.783 kHz)になります。

タイマのデューティ サイクルを外部で変更する間にデッドタイムがソフトウェアで設定されます。

このアプリケーションでは、第1象限と第2象限で動作するために動作領域は50%以上のデューティ サイクルです。

PWM信号ルーティング

6ステップ台形制御の場合、3つのハーフブリッジ ドライバをマイクロコントローラで制御する必要があります。TCDには4つの波形出力のみがあり、そこから直接制御できるのは2つのハーフブリッジ ドライバのみです。残りの2つの相はCCL(構成可能なカスタムロジック)を使って作成します。

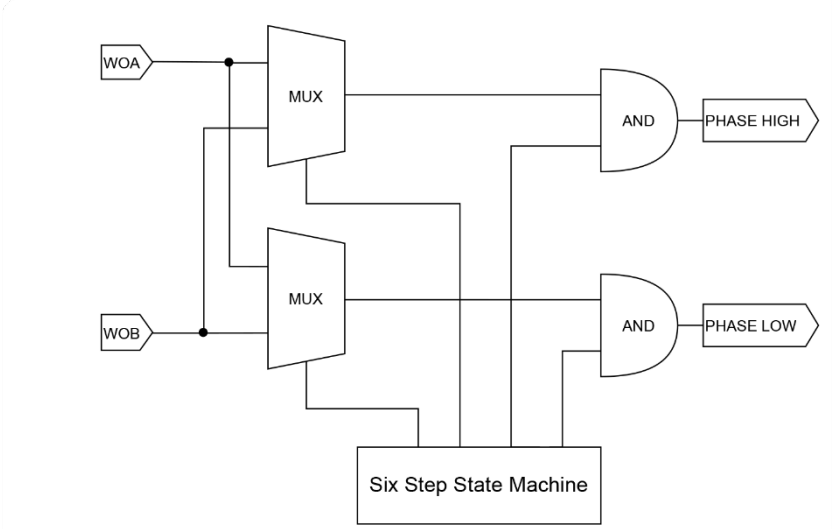
TCDモジュールのWOCおよびWOD出力はマイクロコントローラ上の物理ピンで利用でき、どちらもC相の駆動に使います。

TCDモジュールのWOAおよびWOB出力はそれ以外の2つの相の制御に使います。CCLロジックにより、WOAとWOBの信号は2つの異なるピンのペアで利用可能です。

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

システムの挙動に基づく1つの相の等価ロジックはTRUTHレジスタを使って設定します。

図4-4. 等価ロジック ルーティング回路図



CCLロジックはハーフブリッジ ドライバへのPWM信号のスマート ルーティングを実装します。これによりPWMの相補ペア1つ(WOAとWOB)だけで2つのモータ相を制御できます。以下のユースケースを参照してください。

相の順状態がLowの場合、WOAはローサイド トランジスタに、WOBはハイサイド トランジスタにルーティングされます。

相の順状態がHighの場合、WOAはハイサイド トランジスタに、WOBはローサイド トランジスタにルーティングされます。

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

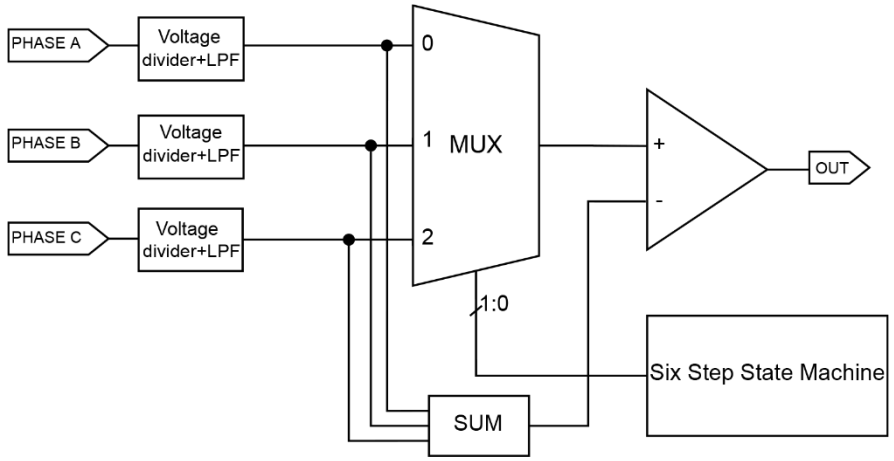
4.3 ゼロクロス検出

正確なスイッチング点を確保するには、ゼロクロス点を高精度に検出する必要があります。各相に存在する電圧の振幅を分圧器を使って低減し、ローパスRCフィルタで処理します。

内部コンパレータ(AC1)を1つ使って、フィルタ処理した電圧を全相電圧の合計として得られるモータの仮想中点と比較します。

ここで使うAC1コンパレータには、内蔵マルチプレクサを介して選択できる反転および非反転入力が複数あります。この機能を利用してAC1入力機能をステートマシンで切り換える事で、3相全てを1つのACで使えるようになり、必要な周辺モジュールの数を減らす事ができます。図4-5に、ゼロクロス点の検出に使う等価回路を示します。

図4-5. ゼロクロス検出用の等価回路



4.4 ゼロクロス フィルタ処理

ノイズまたはモータ特性等の要因によりゼロクロス点の検出が理想的な検出タイミングより早まる事も遅れる事もあります。

モータのロック解除につながりかねない望ましくない挙動を回避するにはフィルタ処理方式を使います。このフィルタの基本的な制約事項としていくつかの簡単なルールに従う必要があります。

- 中程度の速度変化の場合、フィルタの値はモータの反応時間に影響するほど高くせず、本来の目的が無意味になるほど低くもしない事
- フィルタの計算量を多くしない事。望む結果を得るのに長い時間がかかり、整流点が遅延する恐れがあります
- 最良の結果を得るには、パススルーの遅延を最低限にする必要があります

以上の要件に基づき、式 $y\left(n\right) = \frac{y(n-1) \times (a-1)}{a} + \frac{x(n)}{a}$ (*y*はフィルタの出力、*x*は入力、*a*はフィルタ係数)を使って移動平均ローパスフィルタの形式で1次IIRフィルタを選択します。

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

理想的には、計算を高速化するためにフィルタ係数(MOTOR_DIVISION_FACTOR)を2のべき乗にする必要があります。これは特定のコア命令でビットシフトを使って実装できるためです。

入出力値は符号なし16ビット値であるため、*y(n-1)*の乗算および総和時にオーバーフローを防ぐには、符号なし32ビット値に型変換して演算を実行します。

このアプリケーションの適用範囲を考えると、フィルタ係数の値は4にするのが最適だと判断しました。

4.5 30°のタイミング

30°の待機時間は整流点から次のゼロクロス点までの時間として定義されます。台形制御では、ゼロクロスが見つかると、システムは30°の電気角で整流の発生を待つ必要があります。

整流が想定よりも前または後に実行される場合、この時間の変更をそれぞれ「進角」または「遅角」と言います。

進角は加速時にトルクを大きくするために行います。同様に、遅角時には制動力が強まります。

固定された進角値を実装するには、パススルーの遅延を補償するために新たに計算した30°の時間から値を減算して進角時間を整流点に追加します。

これを実行するコード行は`tempValue = timerValue - MOTOR_ADVANCE_TIME;`です。

4.6 BEMF整流ノイズ ブランキング

台形制御では、システムが次のステップに移る時、新しいステップ固有の開放相端子のBEMFが整流ノイズの影響を受けます。これが誤ったゼロクロス点をトリガする可能性があるため、そのシーケンスのキャプチャを回避する必要があります。

これをブランキング時間と呼びます。この時間はモータの速度を基に設定します。例えば、高速のシナリオで低速に適したブランキング時間を設定した場合、ブランキング時間を必要以上に確保しているためにゼロクロスがキャプチャされない可能性があります。ブランキング時間は、30°のタイミングで利用した前回の値の半分を使って計算します。

4.7 時間関連イベントの処理

モータの駆動は時間に大きく依存します。このシステムでは、TCAモジュールの2つのインスタンスとTCBモジュールの1つのインスタンスを使って時間関連イベントを処理します。

TCAモジュールの最初のインスタンス(TCA0)は、システムがRamp-Up/Closed Loopモードの時にモータの速度を制御します。TCA0は、CMP0コンペアレジスタの値によって決まる間隔で周期的割り込みをトリガします。

CMP0レジスタの値を下げると、割り込み周期が短くなり、モータの加速が増します。レジスタ値の減少が停止した場合、モータが一定周期で整流され、制御モードがOpen Loopモードに切り換わります。

割り込み時間になると、アルゴリズムが次の台形ステップに移行してから割り込みをトリガします。これは以下のコード行で実行されます。

```
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モジュールの2番目のインスタンス(TCA1)は、各ステップ内の時間関連モータイベントの駆動/処理に使われます。

台形の1ステップの間にカウンタは以下の4つの目的を果たします。

- ブランキング時間を処理
- 整流点からゼロクロス点までの時間をカウント
- 新しく計算したゼロクロス点から新しい整流点までの時間をカウント
- ストール検出(ゼロクロス タイムアウト)を処理

カウンタには3つのコンペア チャンネルがあり、それぞれが特定の割り込みをトリガするように設定されています。

動作の方法を以下に示します。

新しい整流の後、CNTレジスタの値がクリアされてCMP0割り込みを有効にします。

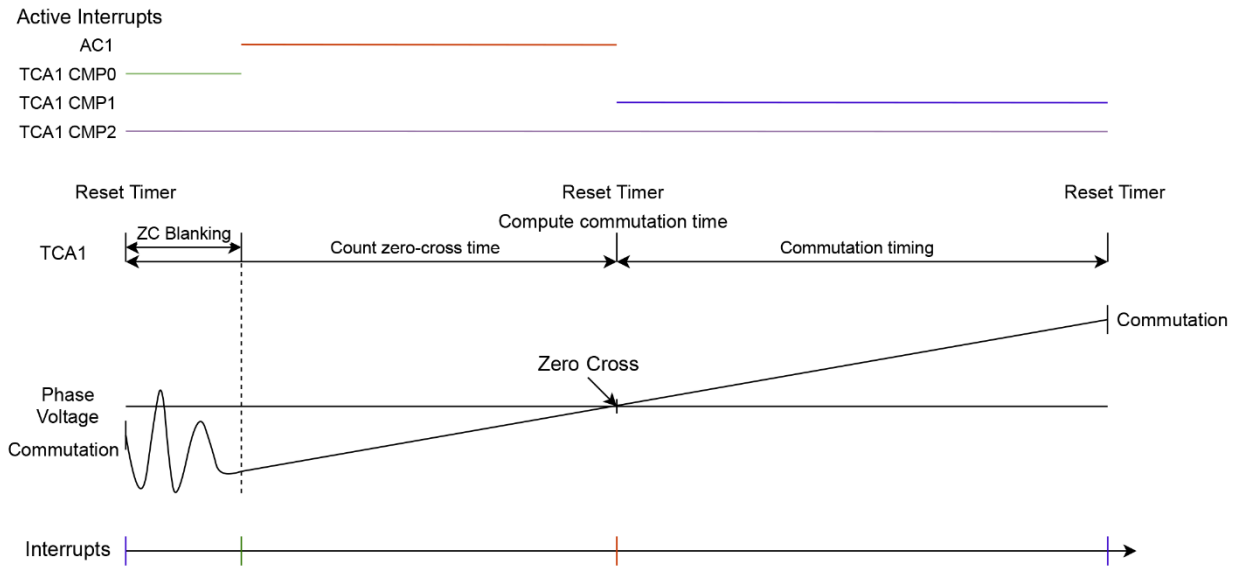
© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

CMP0割り込み時間になると、ACT1割り込みを有効に、CMP0割り込みを無効にします。

CMP2の時間間隔内でゼロクロスが検出されるとタイマが停止し、CNTレジスタの値がゼロクロス フィルタで処理されてCMP1レジスタに設定されます。カウンタレジスタが再度クリアされ、CMP1割り込みを有効にします。

タイマがCMP1の値に達すると割り込みをトリガし、次のステップまで整流を行い、CMP1割り込みを無効にし、以降このサイクルを繰り返します。図4-6に、このブロックの機能を詳細な時間領域で示します。

図4-6. 時間領域で表したTCA1



TCB0タイマ/カウンタは、タイム クリティカルでないタスクを実行する場合にごく基本的なスケジューラのように機能します。コンペアレジスタに固定値を使い、このコンペアレジスタで割り込みをトリガし、メインループでチェックした`SCHEDULER_mainLoopFlag`を設定します。

4.8 過電流保護

モータ、電源段、電源を保護するには過電流保護方式が必要です。これは、電流の方向も検出できるようにV_{DD}/2のDCオフセットを持つアナログ信号を出力する電流シャントを使って実装します。従って、V_{DD}/2の値では電流がゼロであることを示します。

応答を高速化するために、ウィンドウモードの2つの内部アナログ コンパレータを使って過電流を検出します。

ウィンドウの上限と下限は各コンパレータに1つずつ、2つのDACを使って生成されます。この現在のウィンドウによって生成された割り込みはシステムを強制的にFault状態にします。

4.9 ストールの検出

この実装ではストール検出方法として以下の3つの方式を採用しています。

- TCA1 CMP2割り込みを使ったゼロクロス タイムアウト
- ゼロクロス デルタリミットの使用。つまり、ゼロクロス検出時に前回から見てモータが急激に変化した場合、モータがストールしているとみなされます。
- これはおそらくストール時に巻き線を流れる電流が大幅に上昇し、過電流制限値を超過した事を示しています

ストール検出で最も注意が必要なのは始動時です。モータがOpen Loopモードで加速した後でClosed Loopに切り換わる時、BEMFが駆動コイルと非駆動コイルの磁気結合の結果として発生し、可動磁石によってコイルに誘起される電圧ではないにも関わらず、システムは誤ったゼロクロスを認識する場合があります。

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

4.10 RPM計測

rpm計測には、フィルタ処理したゼロクロスの時間を使います。つまり、台形ステップ (モータが整流する時点からゼロクロスが検出される時点まで)の半分のみを使ってrpmを計算します。そのため、モータのrpmの検出精度は低下します。

rpmを計算するには、ゼロクロスタイマの値を2倍して台形ステップの期間を求め、それを6倍して電気的周期を求めます。この後は、$RPM = 120/(Te \times P)$の式に値を入れるだけです(この式のT_eは電気周波数、Pはモータ固有の極ペアの数)。

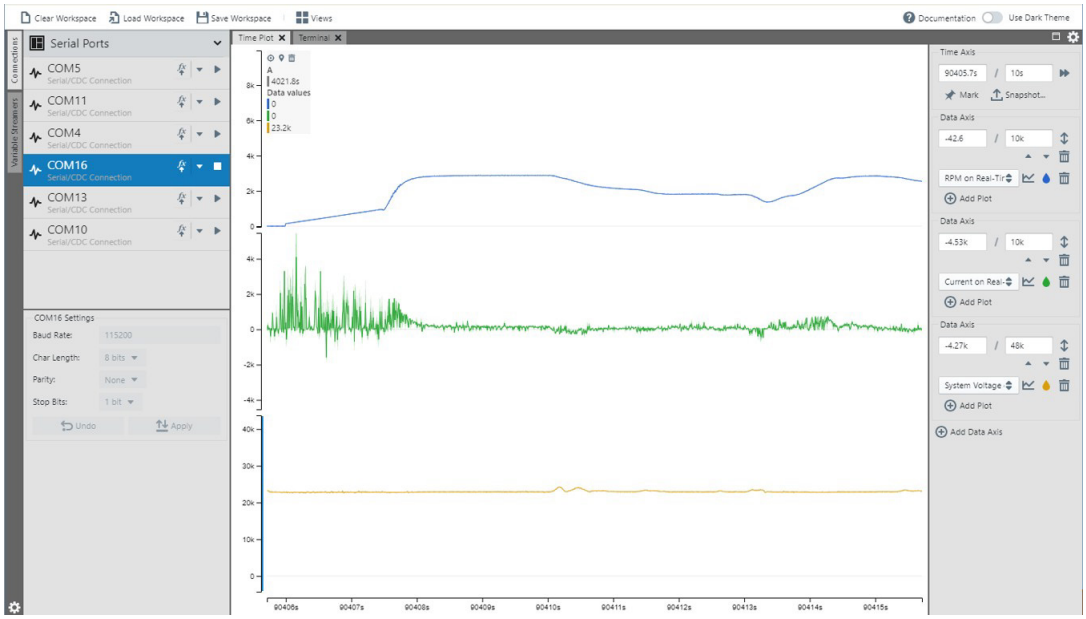
この影響を補正するために、TCA1タイマ/カウンタのプリスケーラを低速時にオーバーフローしない範囲でできるだけ高い値を得られるように調整しました。

ゼロクロスタイマの値を出力し、最小rpmで可能な最大値(整流からゼロクロス信号までの最大時間間隔)を得るようにプリスケーラを変更する事で最適なプリスケーラを設定しました。

4.11 デバッグ

MPLAB® Data Visualizerはライブデータの表示およびデバッグに使います。

図4-7. MPLAB® Data Visualizerの例



以下の変数を表示できます。

- モータ速度(rpm)
- モータ電流(mA)
- システム電圧(mV)

さらに、フォルトや状態変化を表示するデバッグ メッセージを有効にし、MPLAB Data Visualizerのターミナル セクションで表示できます。`app.c`ファイルにあるプロジェクトのアプリケーション領域に以下のコード行が記載されています。一度に1つの機能(デバッグ メッセージまたはData Visualizer)のみを有効にする事を強く推奨します。既定値ではデバッグ メッセージが無効です。デバッグ メッセージを有効にするには、31行および33行目をコメント化し、30行目のコメント化を外します。コードを変更したら再コンパイルしてプロジェクトをアップロードし直す必要があります。

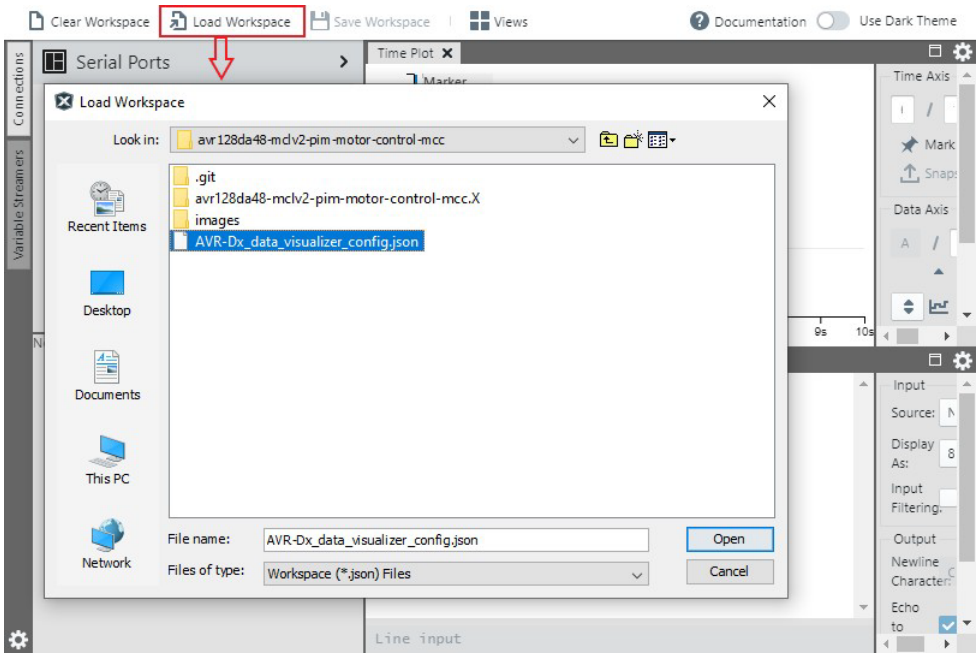
図4-8. デバッグ オプション

```
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
```

設定

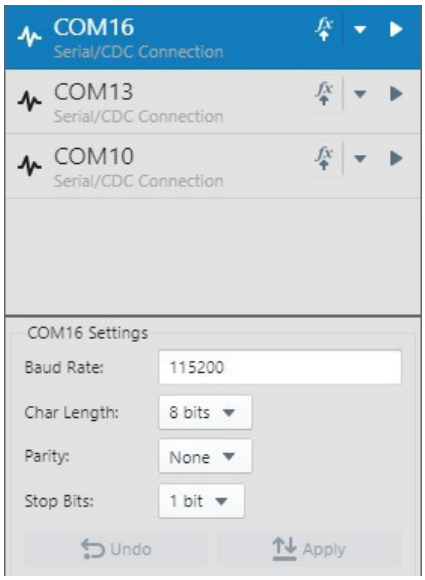
1. mini-USBケーブルを使ってMCLV-2ボードをPCに接続します。
2. MPLAB Data Visualizerプラグインがインストールされている事を確認します。
   2.1. **[Tools]** > **[Plugins]** > **[Available Plugins]**と選択してMPLAB Data Visualizerを検索します。
3. MPLAB Data Visualizerを起動し、最上段のバーで**[Load Workspace]**をクリックします。リポジトリのルートにある`.json`ファイルを選択します。

図4-9. ワークスペースのロード



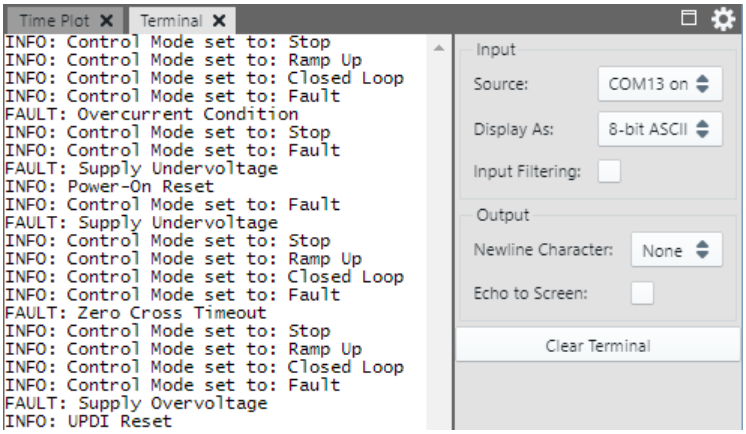
4. 左の**[Connections]**タブで**COMポート**を選択し、[Baud Rate]を115200に設定します。それ以外の設定は図4-10と同じ状態にします。

図4-10. COMポートの設定



5. 選択したCOMポートの**[Start streaming]**ボタンを押します。[Time Plot]にトレースを表示するには、[Show Live Data]モードを有効にする必要があります。
   - デバッグ メッセージが有効になっている場合(`app.c`ソースファイルのマクロを参照)、[Display As]モードを8ビットASCIIに設定すると**[Terminal]**タブでデバッグ メッセージを表示できます。

図4-11. 各種状態およびフォルトのデバッグ メッセージ



5. PIM(プラグイン モジュール) ボードの説明

AVR DX PIMには以下の2種類があります。

- 内蔵オペアンプタイプ: オペアンプを内蔵したAVR128DB48マイクロコントローラをベースにしています。
- 外付けオペアンプタイプ: AVR128DA48をベースにしたプレーン バージョンで、外付けのMCLV-2オペアンプを使います。

図5-1. 内蔵オペアンプを使うAVR® DB PIM

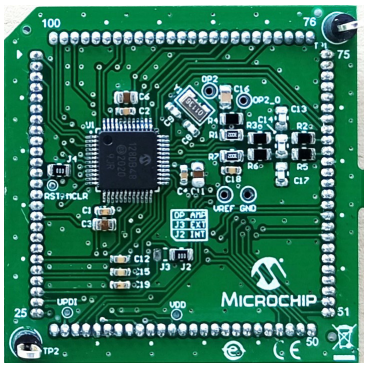
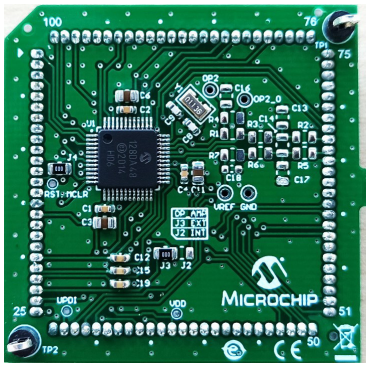


図5-2. 外付けオペアンプを使うAVR® DA PIM



内蔵オペアンプの使用は、外付けオペアンプが不要なAVR DBファミリ等のオペアンプ モジュールを実装したマイクロコントローラに主に依存しています。増幅された電流はソフトウェアで調整可能な制限値を設定したコンパレータ ウィンドウに送られ、ユーザがPIM上で単一選択ジャンパを変更する事で内部または外部参照電圧を選択できます。

電流シャントからの信号とモータの逆起電力の両方にアクセスするには特殊なコンフィグレーション ボードが必要です。このボードはPIMと同じパッケージで提供されます。これは内蔵オペアンプの参照電流を使う場合にのみ必要です。ただし、外付けオペアンプで動作するようにPIMが設定されている場合、付属のMCLV-2 EXTERNAL OP_AMPコンフィグレーション ボードを使う事もできます。

5.1 ピン割り当て

表5-1に、100ピンPIMと48ピンデバイスの間のピンの対応を示します。

表5-1. ピン割り当て表(PIMピンの番号順に記載)

PIMピン番号	信号名	ピンの説明	AVR® DXピン
1	DBG_LED2	デバッグLED 2	PA5
2	VDD	デジタル電源	VDD
3	PWM1H3	PWM出力 - 3H	PA6

.....続き

PIMピン番号	信号名	ピンの説明	AVR® DXピン
13	MCLR	デバイスマスタ クリア	PF6
15	V_{SS}	デジタル電源	GND
16	V_{DD}	デジタル電源	VDD
18	FAULT	DCバス電流フォルト (アクティブLowのロジック)	PC2
19	TX	UART送信	N/A
20	PIM_V_M3	電圧フィードバック信号	PD4
21	PIM_V_M2	電圧フィードバック信号	PD6
22	PIM_V_M1	電圧フィードバック信号	PD3
23	PIM_IMOTOR_SUM	DCバス電流信号	PD2
24	PIM_IMOTOR2	相電流信号	PE0
25	PIM_IMOTOR1	相電流信号	PF2
26	PGC	デバイス プログラミング クロックライン	N/A
27	PGD	デバイス プログラミング データライン	UPDI
28	V_{REF}	参照電圧(AV_{DD}電圧の半分)	PD7
29	PIM_REC_NEUTR	再構成されたモータ中点ライン電圧	PD5
30	AV_{DD}	アナログ電源	AVDD
31	AV_{SS}	アナログ電源	GND
32	PIM_POT	ポテンショメータ信号	PD0
34	PIM_GEN2	General I/O	PA4
35	PIM_VBUS	DCバス電圧(分圧電圧)	PD1
36	V_{SS}	デジタル電源	GND
37	V_{DD}	デジタル電源	VDD
41	PIM_MONITOR_1	ホール効果センサ/電流検出/電圧フィードバック信号	N/A
42	PIM_MONITOR_2	ホール効果センサ/電流検出/電圧フィードバック信号	N/A
43	PIM_MONITOR_3	ホール効果センサ/電流検出/電圧フィードバック信号	N/A
45	V_{SS}	デジタル電源	GND
46	V_{DD}	デジタル電源	VDD
47	HALLB	ホール効果センサ/QEI入力	PB5
48	HALLC	ホール効果センサ/QEI入力	PB4
49	RX	UART受信	PA0
50	TX	UART送信	PA1
51	USB_TX	UART送信ポイント(U7に直接接続)	PB1
52	USB_RX	UART受信ポイント(U7に直接接続)	PB0
58	PIM_FLT_OUT2	General I/O	PC6
59	PIM_FLT_OUT1	General I/O	PC5

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

.....続き

PIMピン番号	信号名	ピンの説明	AVR® DXピン
60	DBG_LED1	デバッグLED 1	PC0
61	HOME	QEI向けホーム位置信号	PC7
62	VDD	デジタル電源	VDD
63	OSC1/CLKO	水晶振動子IN	N/A
64	OSC2/CLKI	水晶振動子OUT	N/A
65	VSS	デジタル電源	GND
66	PIM_IBUS+	バス電流シャント信号	N/A
67	PIM_IBUS-	バス電流シャント信号	N/A
68	LIN_CS	LINチップセレクト信号	PA2
69	LIN_FAULT	LINフォルト信号	PC1
70	RX	UART受信	N/A
72	USB_RX	UART受信ポイント(U7に直接接続)	N/A
73	PIM_IB+	IMOTOR1シャント信号	N/A
74	PIM_IA+	IMOTOR2シャント信号	N/A
75	VSS	デジタル電源	GND
76	USB_TX	UART送信ポイント(U7に直接接続)	N/A
77	CAN_TX	CAN送信	N/A
78	CAN_RX	CAN受信	N/A
80	HALLA	ホール効果センサ/QEI入力	PB2
82	PIM_GEN1	General I/O	N/A
83	BTN_1	押しボタンS2入力	PF5
84	BTN_2	押しボタンS3入力	PF4
86	VDD	デジタル電源	VDD
87	CAN_RX	CAN受信	N/A
88	CAN_TX	CAN送信	N/A
93	PWM1L1	PWM出力 - 1L	PC3
94	PWM1H1	PWM出力 - 1H	PA3
98	PWM1L2	PWM出力 - 2L	PF3
99	PWM1H2	PWM出力 - 2H	PB3
100	PWM1L3	PWM出力 - 3L	PA7

Note:

1. デジタル電源(V_{DD})ピンはPIMに接続されます。
2. デジタルグランド(V_{SS})およびアナロググランド(AV_{SS})ピンはPIMに接続されます。

表5-2に、48ピンデバイスと100ピンPIMの間の対応を示します。

表5-2. ピン配置表(AVR® DXピン名順に記載)

PIMピン番号	ピン名称	ピンの説明	AVR® DXピン
30	AV_{DD}	アナログ電源	AVDD
31	AV_{SS}	アナログ電源	GND
15	V_{SS}	N/A	GND
36	V_{SS}	N/A	GND
45	V_{SS}	N/A	GND
65	V_{SS}	N/A	GND
75	V_{SS}	N/A	GND
19	TX	UART送信	N/A
26	PGC	デバイス プログラミング クロックライン	N/A
41	PIM_MONITOR_1	ホール効果センサ/電流検出/電圧フィードバック信号	N/A
42	PIM_MONITOR_2	ホール効果センサ/電流検出/電圧フィードバック信号	N/A
43	PIM_MONITOR_3	ホール効果センサ/電流検出/電圧フィードバック信号	N/A
63	OSC1/CLKO	水晶振動子IN	N/A
64	OSC2/CLKI	水晶振動子OUT	N/A
66	PIM_IBUS+	バス電流シャント信号	N/A
67	PIM_IBUS-	バス電流シャント信号	N/A
70	RX	UART受信	N/A
72	USB_RX	UART受信ポイント(U7に直接接続)	N/A
73	PIM_IB+	IMOTOR1シャント信号	N/A
74	PIM_IA+	IMOTOR2シャント信号	N/A
76	USB_TX	UART送信ポイント(U7に直接接続)	N/A
77	CAN_TX	CAN送信	N/A
78	CAN_RX	CAN受信	N/A
82	PIM_GEN1	General I/O	N/A
87	CAN_RX	CAN受信	N/A
88	CAN_TX	CAN送信	N/A
49	RX	UART受信	PA0
50	TX	UART送信	PA1
68	LIN_CS	LINチップセレクト信号	PA2
94	PWM1H1	PWM出力 - 1H	PA3
34	PIM_GEN2	General I/O	PA4
1	DBG_LED2	デバッグLED 2	PA5
3	PWM1H3	PWM出力 - 3H	PA6
100	PWM1L3	PWM出力 - 3L	PA7
52	USB_RX	UART受信ポイント(U7に直接接続)	PB0

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

.....続き

PIMピン番号	ピン名称	ピンの説明	AVR® DXピン
51	USB_TX	UART送信ポイント(U7に直接接続)	PB1
80	HALLA	ホール効果センサ/QEI入力	PB2
99	PWM1H2	PWM出力 - 2H	PB3
48	HALLC	ホール効果センサ/QEI入力	PB4
47	HALLB	ホール効果センサ/QEI入力	PB5
60	DBG_LED1	デバッグLED 1	PC0
69	LIN_FAULT	LINフォルト信号	PC1
18	FAULT	DCバス電流フォルト (アクティブLowのロジック)	PC2
93	PWM1L1	PWM出力 - 1L	PC3
59	PIM_FLT_OUT1	General I/O	PC5
58	PIM_FLT_OUT2	General I/O	PC6
61	HOME	QEI向けホーム位置信号	PC7
32	PIM_POT	ポテンショメータ信号	PD0
35	PIM_VBUS	DCバス電圧(分圧電圧)	PD1
23	PIM_IMOTOR_SUM	DCバス電流信号	PD2
22	PIM_V_M1	電圧フィードバック信号	PD3
20	PIM_V_M3	電圧フィードバック信号	PD4
29	PIM_REC_NEUTR	再構成されたモータ中点ライン電圧	PD5
21	PIM_V_M2	電圧フィードバック信号	PD6
28	V_{REF}	参照電圧(AV_{DD}電圧の半分)	PD7
24	PIM_IMOTOR2	相電流信号	PE0
25	PIM_IMOTOR1	相電流信号	PF2
98	PWM1L2	PWM出力 - 2L	PF3
84	BTN_2	押しボタンS3入力	PF4
83	BTN_1	押しボタンS2入力	PF5
13	MCLR	デバイスマスタ クリア	PF6
27	PGD	デバイス プログラミング データライン	UPDI
2	V_{DD}	N/A	VDD
16	V_{DD}	N/A	VDD
37	V_{DD}	N/A	VDD
46	V_{DD}	N/A	VDD
62	V_{DD}	N/A	VDD
86	V_{DD}	N/A	VDD

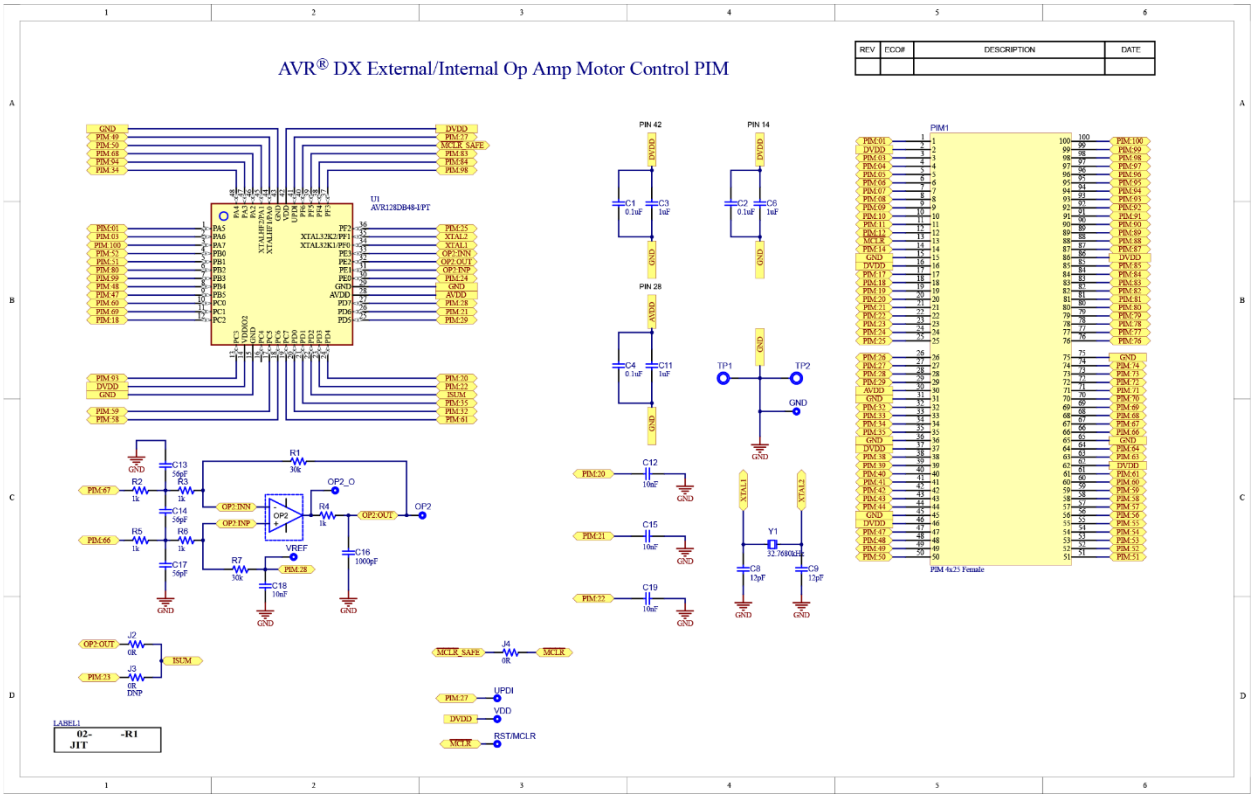
© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

Note:

1. デジタル電源(V_{DD})ピンはPIMに接続されます。
2. デジタルグランド(V_{SS})およびアナロググランド(AV_{SS})ピンはPIMに接続されます。

5.2 PIM回路図

図5-3. PIM回路図

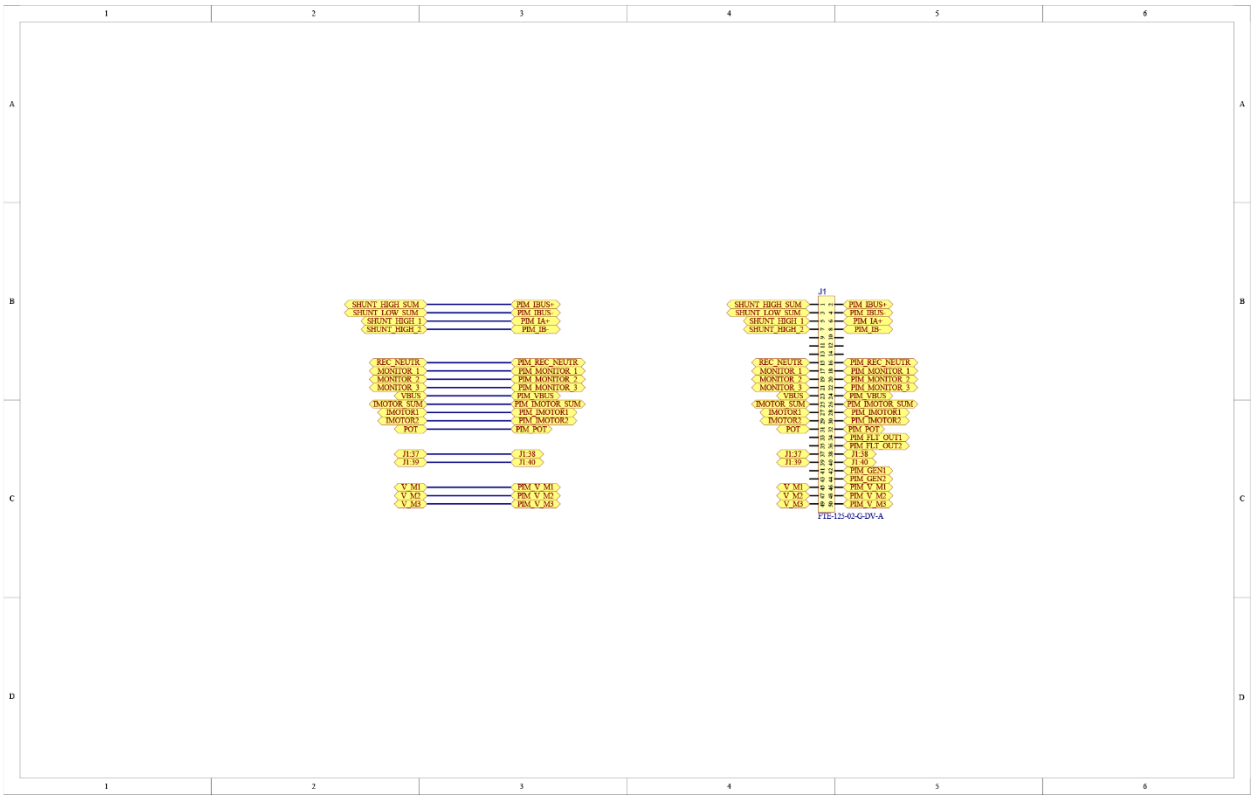


Note:

1. ジャンパJ2およびJ3は外付けオペアンプと内蔵オペアンプの切り換えに使います。
2. ジャンパJ4を抵抗に交換する事で偶発的なHVプログラミング モードからマイクロコントローラを保護できます。

5.3 コンフィグレーション ボード回路図

図5-4. PIM回路図

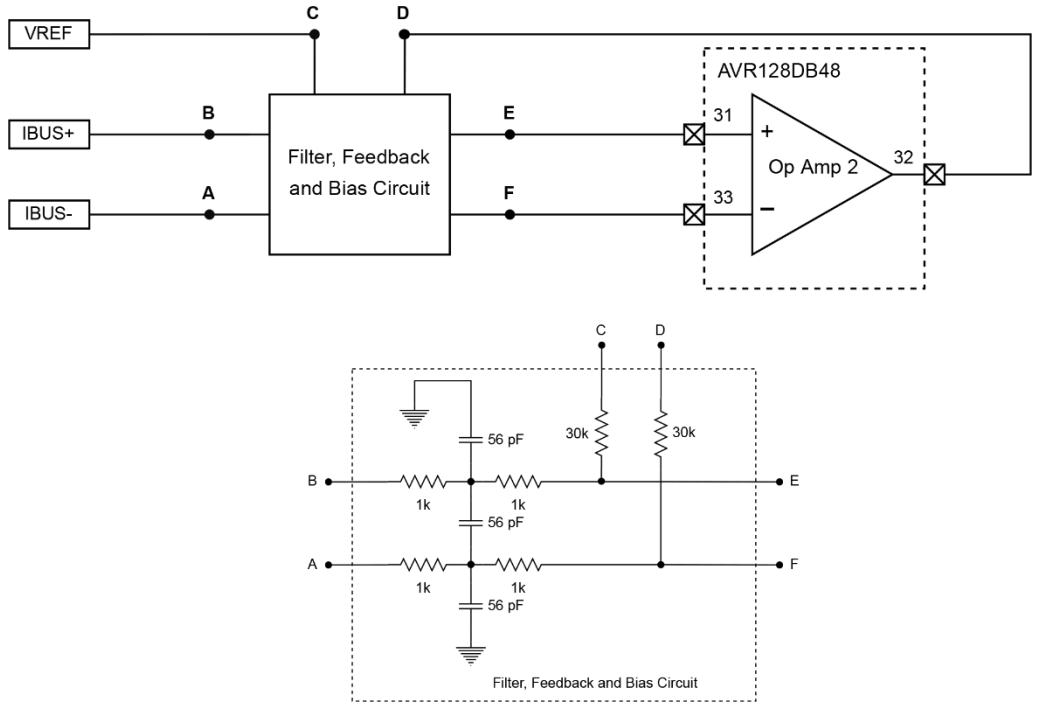


5.4 アナログ機能

表5-3. 内蔵オペアンプのパラメータ

オペアンプNo.	アナログ機能	受動素子	設計式
2	ローパス フィルタ	R2, R3, R5, R6, C13, C14, C17	$R2 = R3 = R5 = R6 = R$ $C13 = C17 = C$ $R1 = R7$ コモンモード $f_{-3\ dB} \cong \frac{1}{2\pi RC}$ 差動モード $f_{-3\ dB} \cong \frac{1}{2\pi\left(2R\right)\left(\frac{C}{2} + C14\right)}$ 差動アンプのゲイン $\cong \frac{R7}{2R}$
	参照電圧のバイアス	R1、R7	
	差動アンプの入力	R2、R3、R5、R6	
	差動アンプの帰還	R1	

図5-5. 内蔵オペアンプの構成

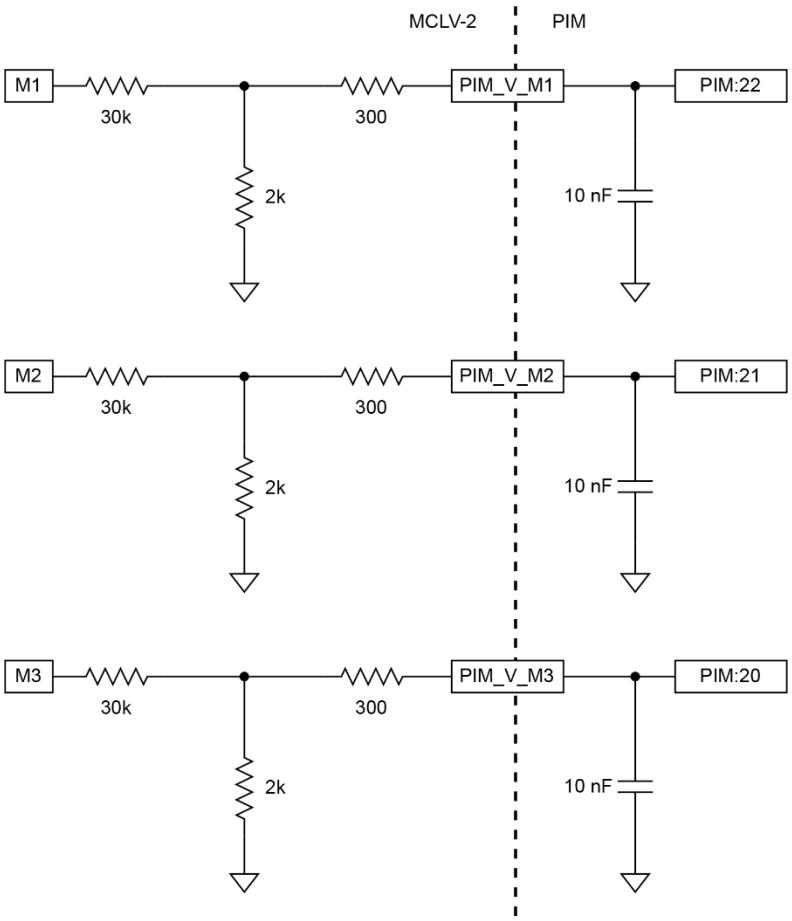


差動アンプのゲイン = $\frac{30k\Omega}{2*1k\Omega} = 15$

差動モード $f_{-3\ dB} \cong \frac{1}{2\pi\left(2*1k\Omega\right)\left(\frac{56\,pF}{2}+56\,pF\right)} \cong 948\,KHz$

コモンモード $f_{-3\ dB} \cong \frac{1}{2\pi(1k\Omega)(56\,pF)} \cong 2.8\,MHz$

図5-6. 相逆起電力向けの分圧器とローパスフィルタ



カットオフ周波数$_{-3\ dB} = \frac{1}{2\pi(30k \parallel 2k + 300)\ 10\ nF} \cong 7321\ Hz$

30°位相シフト周波数 = $\frac{\tan\ (30)}{2\pi(30k \parallel 2k + 300)\ 10\ nF} = 4226\ Hz$

上記の式から理論上のモータ最大速度は以下の通りです。

$4226\ Hz * 60 \cong 253560\ eRPM$

$機械RPM = eRPM/極ペア$

5.5 ユーザ インターフェイス

表5-4に、AVR DX PIMを使ったMCLV-2ボードのユーザ インターフェイスを示します。

表5-4. ユーザ インターフェイスの説明

インターフェイス	タイプ	機能	説明
S1	入力	リセット	このボタンを押すとマイクロコントローラがリセットされ、システムをDriver Init、App Init状態にします。
S2	入力	始動/停止	モータを始動または停止します。Error Handling状態の時にこのボタンを押すと、システムをStop状態にします(ブレーキ時PWM LED D10、D12、D14が点灯します)。
S3	入力	方向の変更	モータの方向を変更します。これはシステムがStop状態であっても使えます。方向を変えると方向LEDも変更されます。
POT1	入力	デューティ サイクルの設定	PWM信号のデューティ サイクルを直接設定します。
D2、D17	出力	モータ方向の表示	モータの方向(モータの配線に応じてCWまたはCCW)を示します。
D10-D15	出力	PWM出力	PWM出力がアクティブかどうかを視覚的に示します。LEDが点灯していない場合はシステムの電源がOFFになっているか、システムの状態がError Handlingです。

6. 調整

6.1 最初の始動

24 Vの電源電圧を供給して既定値を使えばモータは問題なく始動します。

ただし、お使いのモータの極ペアの数は初期設定と異なる場合もあります。この場合、モータ自体は正常に動作しますが、MPLAB Data Visualizerに表示されるrpmの値は正確ではありません。

この問題を修正するには、Excelファイル`AVR_Dx_tuning_params.xslm`の以下の2フィールドを変更する必要があります。

- Motor pole pairs: お使いのモータに従って変更します。
- Target RPM: 以下の式に従って変更します。
  - $NewRPM = NewPolePairs * OldRPM/OldPolePairs$
  - 最も近い整数に丸めます。

結果が順当でモータの反応に問題がなければ調整は不要です。

6.2 Excelファイルによるパラメータの調整

モータが始動しない、あるいはモータの性能が低い場合があります。

図6-1Excelファイルで編集可能なパラメータ

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

以下では、調整パラメータとそのパラメータがシステムの動作に与える影響に焦点を当てて説明します。

1. **Start-up PWM Duty [%]** - 起動時のデューティ サイクルをパーセンテージで表します。値が低過ぎるとランプアップ シーケンスに不十分な場合があります。これは巻き線を流れる電流が小さすぎ、発生する磁場が弱すぎてロータに追従できないためです。
   値が高過ぎると過電流保護が作動する、または巻き線が過熱状態になります。また、始動デューティ サイクルは始動時のモータの負荷に左右されます。負荷が上がると、より高いデューティ サイクルが必要です。

   このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されます。
2. **Rotor align time [ms]** - ロータのアラインメント時間(ミリ秒)。0%から[Start-up PWM Duty]の値まで直線的なランプアップで徐々にデューティ サイクルを上げていくため、機械的な衝撃は生じません。このアラインメントはモータが既知の位置から始動するために行います。
   このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されます。
3. **Target RPM [RPM]** - この値がランプアップ シーケンス後の最終的なrpmです。設定値が高過ぎる場合、モータが高いrpmで磁場に追従できるようにデューティ サイクルも高い値が必要です。
   このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されますが、閉ループ制御もこのパラメータに依存しています。

4. **Initial start-up period [ms]** - ランプの起動点。通常、このパラメータを調整する必要はありません。このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されます。
5. **Ramp duration [ms]** - ランプの継続時間を設定します。起動時間を短くするにはこの値を下げます。強い加速にもより高いデューティ サイクルが必要になるので注意してください。
このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されます。
6. **Ramp sustain duration [ms]** - モータを加速するランプアップ シーケンスの後、**[Target RPM]**の設定速度でモータを回転させる時間がしばらくあります。コントローラのトレーニングに役立つPIコントローラを使う場合を除き、このパラメータは最小値にする事を推奨します。
このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されます。
7. **Hold-off steps** - ランプアップ シーケンスの直後、PWMを無効に、コンパレータを有効にします。これは、位相ノイズがない状態でロータ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、モータの相電圧の変動が軽微でない限り最小値1のままにする必要があります。このパラメータはランプアップ シーケンスにのみ適用されます。
8. **Motor pole pairs** - モータの極ペアの数。.
9. **Minimum PWM duty [%]** - PWMの最小デューティ サイクル。このパラメータはモータの最低速度を制限するために使います。
このパラメータは閉ループおよび開ループ制御に適用されます。
10. **Maximum PWM duty [%]** - PWMの最大デューティ サイクル。このパラメータはモータの最高速度を制限するために使います。
このパラメータは閉ループおよび開ループ制御に適用されます。
11. **Braking PWM duty [%]** - 停止モード時のモータのデューティ サイクル。高速稼働時の制動による過電流からシステムを保護します。この時、ファームウェアはFault状態になってトランジスタを保護します。
このパラメータはStop状態にのみ適用されます。
12. **Motoring current limit [mA]** - Fault状態がトリガされたバスから流れる電流の最大値。最大値はMCLV-2によって4420 mAに制限されています。
このパラメータはError Handling状態を除く全てのシステム状態に適用されます。
13. **Braking current limit [mA]** - Fault状態がトリガされるバスに流す事ができる電流の最大値。最大値はMCLV-2によって-4420 mAに制限されています。
このパラメータはError Handling状態を除く全てのシステム状態に適用されます。
14. **Undervoltage protection [mV]** - MCLV-2のバス電圧の最小値。11 V未満には設定しないでください。
このパラメータはError Handling状態を除く全てのシステム状態に適用されます。
15. **Overvoltage protection [mV]** – システムの最大電圧。単電源の場合は24 V、両電源の場合は48 Vを超えないでください(MCLV-2ユーザガイドを参照)。
このパラメータはError Handling状態を除く全てのシステム状態に適用されます。
16. **Moving average filter division factor** - ゼロクロス時間の移動平均フィルタの分周比は2のべき乗で設定する必要があります。コンパイラが右シフトでこの値を最適化できるためです。値を高くする事を推奨します。なぜなら、グリッチに対するシステムの耐性は高くなるものの、2つのゼロクロス イベント間の最大変動が制限される事でモータの最高加速度も制限されるためです。このパラメータは閉ループ制御にのみ適用されます。
17. **Advance angle [Deg]** - モータの進角。この値を大きくすると、モータ逆起電力のゼロクロス点を考慮しながらその角度の波形の生成を前に繰り上げる事ができます。この値はモータが生成するトルクにも影響します。
このパラメータは閉ループ制御にのみ適用されます。
18. **Pass-through delay compensation [us]** - 次のセクタタイミングに対する固定繰り上げ時間。この値は、ソフトウェアまたはハードウェアの遅延を補償するために次のセクタのタイミングから直接減算されます。このパラメータは閉ループ制御にのみ適用されます。
19. **Delta division factor** - このパラメータは追加のストールおよびグリッチ検出メカニズムを制御します。ゼロクロス点の検出が非常に早い、または非常に遅い場合、前回のゼロクロス時間と現在の計測時間との絶対差が前回のゼロクロス時間/デルタ分周比を上回ると、Fault状態がトリガされます。デルタ分周比は、コード効率のために2のべき乗として選択するのが理想的です。値が高過ぎるとシステムが不安定になり、Fault状態がトリガされて最大加速度が制限されます。値が低過ぎるとグリッチを適切に検出できない可能性がありますが、起動時に不具合が発生する事はありません。
このパラメータは閉ループ制御にのみ適用されます。

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

20. **Minimum RPM tolerance [%]** - このパラメータはタイマのタイムアウトと最小rpmを制御します。起動後、システムによるゼロクロス点検出が必要以上に遅れる事があります。許容範囲が非常に小さい場合はタイムアウト イベントとみなされます。この問題を回避するために、最小rpmのパーセンテージという形で許容範囲を設ける必要があります。従って最小rpmは**Target RPM** - **Target RPM** * **Minimum RPM tolerance**になります。
このパラメータは閉ループ制御にのみ適用されます。

パラメータを変更したら**[Patch File]**ボタンを押して再コンパイルし、ファームウェアをAVR DXにプログラムします。

6.3 制御モードの変更

ランプアップ後、システムはClosed LoopまたはOpen Loopモードで動作します。1行のコードを設定する事でモードを任意に選択できます。

図6-2. 制御モードのコード行

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

有効なオプションは`MOTOR_CLOSED_LOOP_MODE`または`MOTOR_OPEN_LOOP_MODE`です。この2つのモードの動作について以下で説明します。

1. Closed Loopモード: 既定の制御モードでは、内部コンパレータから受信したゼロクロス イベントに従って整流を実行します。有効な保護を以下に示します。
   - 過電流保護
   - 過電圧/低電圧保護
   - ゼロクロスデルタ超過リミット
   - ゼロクロス タイムアウト
2. Open Loopモード: 代替の制御モードでは、ランプアップ シーケンスを担当するタイマを使って整流を実行します。Excelファイルで設定したrpmでモータが回転します。この方式は、ランプアップ シーケンスが正しく動作しているかどうか、ランプの終わり近くでロータが磁場に追従して停止しないかどうかをテストする場合に特に役立ちます。このモードではポテンショメータでデューティ サイクルを設定しますが、モータは一定速度を維持します。このモードで有効な保護を以下に示します。
   - 過電流保護
   - 過電圧/低電圧保護

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

7. まとめ

本書では、双極スイッチングを使ったBLDCモータの駆動方法について波形の生成から必要なピンへの配線までを説明しました。

外部コンパレータまたはその他のロジック回路は必要ありません。唯一の例外は、マイクロコントローラに送る入力信号を調整する少数の受動素子です。

24 MHzで動作して最大24 MIPSを提供するAVRコアは、完全な制御システムとしてモータの駆動に使うCIP(コアから独立した周辺モジュール) (AC、ADC、TCA、TCB、CCL、USART)と併せて複数の要件を統合するシステムを設計する上で非常に強力な選択肢です。

双極駆動により、PWM出力信号との同期を必要とせずにゼロクロス点の正確な検出を支援するクリーンなBEMFが実現します。

性能向上のため、付属の移動平均フィルタが外乱に備えたさらなる保護手段として機能し、モータのrpm範囲全体でスムーズな動作を実現します。

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

8. 参考資料

1. AN857 - やさしいブラシレスDCモータ制御(DS00857)
2. AN1160 - 多数決関数を用いた逆起電力フィルタ処理によるセンサレスBLDC制御(DS01160)
3. AVR444 - 3相ブラシレスDCモータのセンサレス制御
4. AN2522 - Core Independent Brushless DC Fan Control Using CCL AVR® microcontrollers (DS00002522)

© 2022 Microchip Technology Inc.
and its subsidiaries

9. 改訂履歴

文書リビジョン	日付	改訂内容
B	2021年6月	GitHubリンクを追加して「はじめに」セクションを更新しました。
A	2021年5月	初版

Microchip社のウェブサイト

Microchip社はウェブサイト(www.microchip.com)を通してオンライン サポートを提供しています。当ウェブサイトでは、お客様に役立つ情報やファイルを簡単に見つけ出せます。以下を含む各種の情報をご覧になれます。

- **製品サポート** - データシートとエラッタ、アプリケーション ノートとサンプル プログラム、設計リソース、ユーザガイドとハードウェア サポート文書、最新のソフトウェアと過去のソフトウェア
- **技術サポート** - FAQ(よく寄せられる質問)、技術サポートのご依頼、オンライン ディスカッション グループ、Microchip社のデザイン パートナー プログラムおよびメンバーリスト
- **ご注文とお問い合わせ** - 製品セレクタと注文ガイド、最新プレスリリース、セミナー/イベントの一覧、お問い合わせ先(営業所/正規代理店)の一覧

製品変更通知サービス

Microchip社の製品変更通知サービスは、お客様にMicrochip社製品の最新情報をお届けする配信サービスです。ご興味のある製品ファミリまたは開発ツールに関する変更、更新、リビジョン、エラッタ情報をいち早くメールにてお知らせします。

http://www.microchip.com/pcnにアクセスし、登録手続きをしてください。

お客様サポート

Microchip社製品をお使いのお客様は、以下のチャンネルからサポートをご利用になれます。

- 正規代理店
- 技術サポート

サポートは正規代理店にお問い合わせください。各地の営業所もご利用になれます。本書の最後のページに各国の営業所の一覧を記載しています。

技術サポートは以下のウェブページからもご利用頂けます。www.microchip.com/support

Microchip社のデバイスコード保護機能

Microchip 社製品のコード保護機能について以下の点にご注意ください。

- Microchip社製品は、該当するMicrochip 社データシートに記載の仕様を満たしています。
- Microchip社では、通常の条件ならびに動作仕様書の仕様に従って使った場合、Microchip 社製品のセキュリティレベルは、現在市場に流通している同種製品の中でも最も高度であると考えています。
- Microchip社はその知的財産権を重視し、積極的に保護しています。Microchip 社製品のコード保護機能の侵害は固く禁じられており、デジタル ミレニアム著作権法に違反します。
- Microchip社を含む全ての半導体メーカーで、自社のコードのセキュリティを完全に保証できる企業はありません。コード保護機能とは、Microchip 社が製品を「解読不能」として保証するものではありません。コード保護機能は常に進化しています。Microchip 社では、常に製品のコード保護機能の改善に取り組んでいます。

© 2022 Microchip Technology Inc. and its subsidiaries

法律上の注意点

本書および本書に記載されている情報は、Microchip 社製品を設計、テスト、お客様のアプリケーションと統合する目的を含め、Microchip 社製品に対してのみ使う事ができます。それ以外の方法でこの情報を使う事はこれらの条項に違反します。デバイス アプリケーションの情報は、ユーザの便宜のためにのみ提供されるものであり、更新によって変更となる事があります。お客様のアプリケーションが仕様を満たす事を保証する責任は、お客様にあります。その他のサポートはMicrochip 社正規代理店にお問い合わせ頂くか、https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservicesをご覧ください。

Microchip 社は本書の情報を「現状のまま」で提供しています。Microchip 社は明示的、暗黙的、書面、口頭、法定のいずれであるかを問わず、本書に記載されている情報に関して、非侵害性、商品性、特定目的への適合性の暗黙的保証、または状態、品質、性能に関する保証をはじめとするいかなる類の表明も保証も行いません。

いかなる場合もMicrochip 社は、本情報またはその使用に関連する間接的、特殊的、懲罰的、偶発的または必然的損失、損害、費用、経費のいかんにかかわらず、またMicrochip 社がそのような損害が生じる可能性について報告を受けていた場合あるいは損害が予測可能であった場合でも、一切の責任を負いません。法律で認められる最大限の範囲を適用しようとも、本情報またはその使用に関連する一切の申し立てに対するMicrochip 社の責任限度額は、使用者が当該情報に関連してMicrochip 社に直接支払った額を超えません。

Microchip 社の明示的な書面による承認なしに、生命維持装置あるいは生命安全用途にMicrochip社の製品を使う事は全て購入者のリスクとし、また購入者はこれによって発生したあらゆる損害、クレーム、訴訟、費用に関して、Microchip 社は擁護され、免責され、損害をうけない事に同意するものとします。特に明記しない場合、暗黙的あるいは明示的を問わず、Microchip社が知的財産権を保有しているライセンスは一切譲渡されません。

商標

Microchip 社の名称とロゴ、Microchip ロゴ、Adaptec、AVR、AVRロゴ、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi ロゴ、MOST、MOST ロゴ、MPLAB、OptoLyzer、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 は米国とその他の国におけるMicrochip TechnologyIncorporated の登録商標です。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control SolutionsCompany、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLightLoad、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus ロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime、ZL は米国における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、Clockstudio、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、KoD、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified ロゴ、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、RippleBlocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、TotalEndurance、Trusted Time、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect、ZENAは米国とその他の国におけるMicrochip Technology Incorporated の商標です。

SQTP は米国におけるMicrochip Technology Incorporated のサービスマークです。

Adaptec ロゴ、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcom はその他の国におけるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

GestIC は、その他の国におけるMicrochip Technology Germany II GmbH & Co. KG (Microchip Technology Incorporated の子会社) の登録商標です。

その他の商標は各社に帰属します。

© 2022, Microchip Technology Incorporated and its subsidiaries.

All Rights Reserved.

ISBN: 978-1-5224-9111-8

品質管理システム

Microchip社の品質管理システムについてはwww.microchip.com/qualityをご覧ください。

各国の営業所とサービス

南北アメリカ	アジア/太平洋	アジア/太平洋	欧州
本社 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277 技術サポート: http://www.microchip.com/support URL: www.microchip.com **アトランタ** Duluth, GA Tel: 678-957-9614 Fax: 678-957-1455 **オースティン、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 **サンノゼ、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SAR** 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 - 厦門** Tel: 86-592-2388138 **中国 - 珠海** Tel: 86-756-3210040	**インド - バンガロール** Tel: 91-80-3090-4444 **インド - ニューデリー** Tel: 91-11-4160-8631 **インド - プネ** 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	**オーストリア - ヴェルス** 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 - ガーヒンク** Tel: 49-8931-9700 **ドイツ - ハーン** Tel: 49-2129-3766400 **ドイツ - ハイルブロン** 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 - パドヴァ** Tel: 39-049-7625286 **オランダ - ドリューネン** Tel: 31-416-690399 Fax: 31-416-690340 **ノルウェー - トロンハイム** Tel: 47-7288-4388 **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 - ヨーテボリ** 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 - ウォーキンガム** Tel: 44-118-921-5800 Fax: 44-118-921-5820