

AVR443 : 3相ブラシレスDCモータの感知器に基く制御

Atmel 8ビット AVR マイクロコントローラ

要点

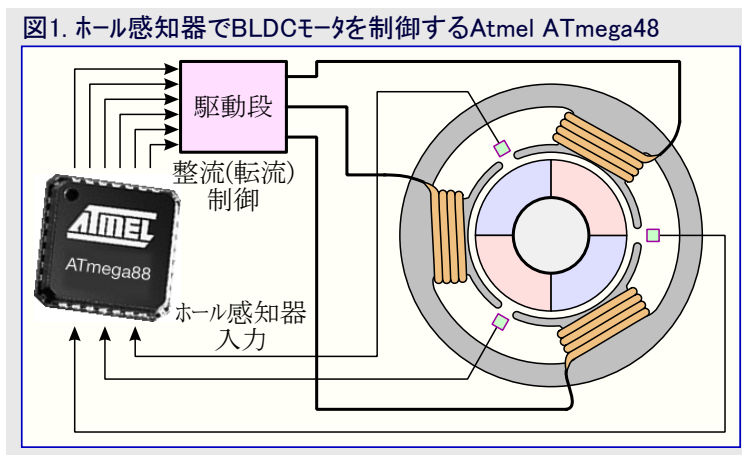
- ホール感知器出力変化での $5\mu\text{s}$ 未満の応答時間
- 原理的に1600kRPMの最大回転数
- 過電流検知と停止検出
- 閉路調整支援
- 通信に関してUART, TWI, SPIが利用可能

序説

ブラシレスDC (BLDC) モータの使用は継続的に増加しています。その理由は明白で、BLDCモータが電力に比して良好な重量/大きさを持ち、素晴らしい加速性能を持ち、保守の必要性が全くまたは殆どなく、ユニバーサル(ブラシ型)モータよりも少ない音響的、電気的な雑音しか生じないからです。

ユニバーサルDCモータではブラシが正しい瞬間で物理的にコイルを接続することによって整流(転流)を制御します。電気構成物は整流(転流)する時についての情報を提供する位置感知器入力、またはコイルで生成される逆起電力の使用のどちらかを持ち得ます。位置感知器は始動トルクが大きく変化する応用や、大きな初期トルクが必要とされる応用で頻繁に使用されます。位置感知器はモータが位置決めで使用される応用でも度々使用されます。感知器なしBLDC制御は初期トルクがあまり変化しない時や、位置制御が注目されない場合、例えばファンに於いて、度々使用されます。

この応用記述は(単にホール感知器として参照される)ホール効果位置感知器でのBLDCモータの制御を記述します。この実装は両方向と開路速度制御を含みます。



目次

1. 動作の理屈	3
1.1. 基本BLDCモータの操作	3
1.2. 実装 - ホール感知器に基づくBLDCモータの制御	4
1.3. ソフトウェア説明	5
1.4. 現実装の性能	5
2. 改訂履歴	5

1. 動作の理屈

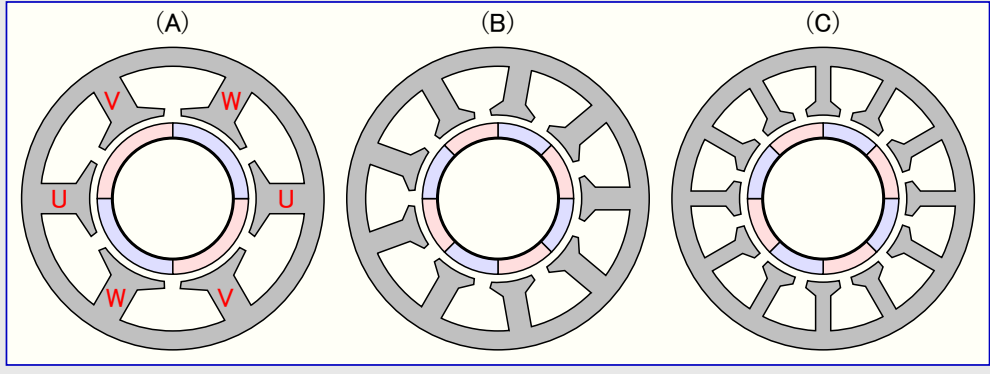
位置感知器とでのBLDCモータの制御はA/D変換器(ADC)とPWM出力を持つタイマ/カウンタのように基本的なハードウェア周辺機能の特徴とする十分に強力なマイクロコントローラで実装することができます。Atmel ATmega48はBLDCモータ制御に対する必要条件を良好に網羅し、未だ他の作業を可能にする資源を持ちます。他の関連作業は例えば、SPI,UART,TWI規約を使用して通信を行うことができます。

3相BLDCはいくつかのコイルを持つ固定子から成ります。基本的な3相BLDCモータは3つのコイルを持ちます(図1をご覧ください)。一般的にこの3つのコイルはU,V,Wとして参照されます。多くのモータでは、より小さな回転段階とより小さなトルク揺らぎを持つように基本コイル数が多重化されます。

BLDCモータの回転子は偶数の永久磁石から成ります。回転子の磁極数もモータの段階量とトルク揺らぎに影響を及ぼします。より多くの極がより小さな段階と少ないトルク揺らぎを生じます。図1-1は1組の基本コイルと多数の極を持つ各種モータの形態を示します。

図1-1. BLDCモータの各種形式

モータ(A)は2組の基本コイルと4つの(磁)極を持ち、(B)は3組のコイルと8極を持ち、(C)は4組のコイルと8極を持ちます。



コイルが停まる一方で磁石が回転する事実はコイルが回転子に配置される伝統的なユニバーサルDCモータよりも軽いBLDCモータの回転子にします。

1.1. 基本BLDCモータの操作

3相BLDCモータをどう動かすかの説明を簡単にするため、3つのコイルだけを持つ基本BLDCが考察されます。

モータを回転させるためにコイルは予め定められた流れ(順序)で励磁(または活性化)され、時計回りと呼ぶ1方向でモータを回します。逆順での流れを行うと、モータは逆方向で動きます。この流れ(手順)がコイルに於ける電流の流れの方向を定義し、それによって磁界が個別コイルによって生成されることを理解すべきです。電流の方向はコイルによって生成される磁界の向きを決めます。磁界は回転子の永久磁石を引き付け、そして退けます。コイルでの電流の流れ、それによって正にその瞬間で磁界の極性を(正しい手順で)変更することによってモータは回転します。回転子を回すためのコイルを通る電流の流れ切り替えは整流(転流)として参照されます。

3相BLDCモータには6つの整流(転流)状態があります。整流(転流)に於ける6つ全ての状態が実行される時のその手順が回転を続けるために繰り返されます。この手順が完全な電氣的1回転を表します。多極モータについては電氣的な回転が機械的な回転に対応しません。4極BLDCモータは機械的な1回転のために電氣的な2回転周回を費やします。以降で分当たりの回転数(RPM)を特定する時に、別に言及がなければ電氣的な回転数が参照されます。

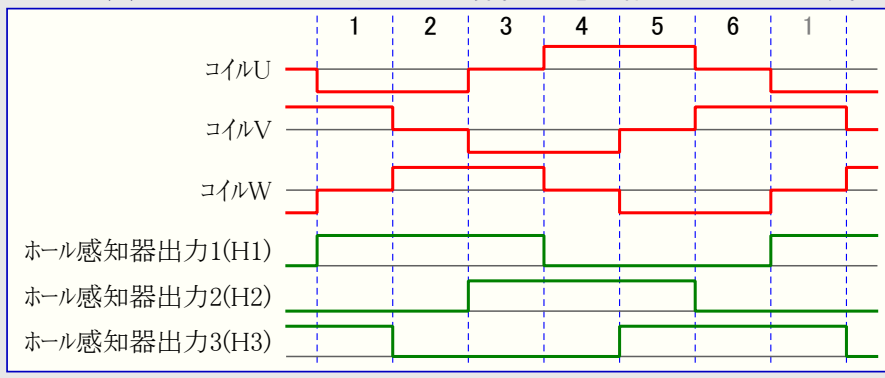
BLDCモータに使用される最も基本的な整流(転流)駆動方法はON/OFFの仕組みです。コイルは(1つまたは別の方向で)導電するか、または導電しないかのどちらかです。コイルを電力に接続し、そして本来の主線が電流の流れを誘引します(駆動段を使用して達成されます)。これは方形波整流(転流)または塊(ブロック)整流(転流)として参照されます。代わりに方法は正弦状波形を使用することです。この応用記述は塊(ブロック)整流(転流)法を網羅します。

磁界の強さがモータのトルクと速度を決めます。コイルを通る電流の流れを変えることにより、モータの速度とトルクを変えることができます。電流の流れを制御するための最も一般的な方法はコイルを通る(平均)電流の流れを制御することです。これはコイルに対する供給電圧のONとOFFを(高速で)切り替えることによって達成することができ、このためにON時間とOFF時間の間の関連がコイル上の平均電圧、そしてそれによる平均電流を定義します。

BLDCモータに関しては整流(転流)制御が電気構成物によって扱われます。整流(転流)を制御するための最も簡単な方法はモータ内側の位置感知器の組からの出力に従って整流(転流)することです。通常、ホール感知器が使用されます。ホール感知器は整流(転流)が変更されるべき時にそれらの出力を変えます(図1-2をご覧ください)。至極簡単です。

BLDCモータ制御応用に於ける電気構成物に関する2つ目の機能は開路または閉路のどちらかの制御によって望むような速度であることを保証することです。けれどもどちらの場合に於いても、停止検出(回転を妨げられたモータ)と過負荷検出を持つことが推奨されます。

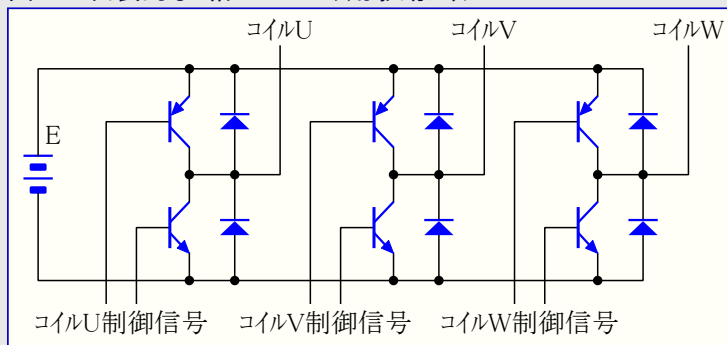
図1-2. BLDCモータ用の6つの整流(転流)状態に於ける、コイルを通る電流の流れ/U,V,Wのコイルによって生成される磁界。ホール感知器出力も示されます。



1.2. 実装 - ホール感知器に基づくBLDCモータの制御

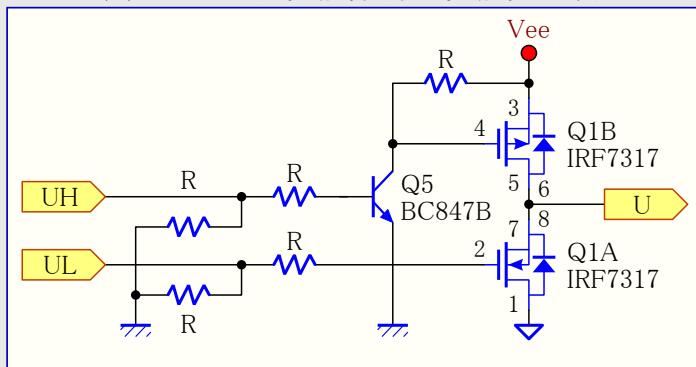
この実装は開路でのBLDCモータ制御です。停止と過負荷の状況に応答できるようにモータ電流が測定され、そして速度が監視されます。3つのPWMチャネルがモータの速度を制御するための半ブリッジのLow側に接続されます。3つの半ブリッジから成るBLDCモータ駆動段は図1-3.で見ることができます。

図1-3. 代表的な3相BLDCモータ用駆動ブリッジ



AVR®からの論理出力レベルでHigh側FETを直接制御することが不可能なことに適応するために、実際としては駆動段が僅かに異なって実装されます。専用FET駆動部を用いた実装はAtmel ATAVRMC100開発基板用で使用され、代替実装は図1-4.で記述されるものにできます。

図1-4. U,V,Wモータコイル用駆動部回路(U駆動部のみ表示)



OC0A, OC0B, OC2Bの3つのPWMチャネルが駆動ブリッジのLow側(例えば、図1-4.でのUL)を制御します。これはタイマ/カウンタ資源の最小使用でハードウェアに基づくPWMを用いて電流の流れを制御する可能性を与えます。これはPWM出力のデューティサイクルを変えることによってモータの速度を制御し、モータの電流の流れとそれによる速度(とトルク)が制御されます。

ブリッジのHigh側もPWMに基づく制御が可能ですが、Atmel ATmega48の全てのタイマ/カウンタを必要とします。更に、駆動部回路に貫通保護が統合されるか、またはソフトウェアで沈黙時間が扱われるかのどちらかを必要とします。能動ブレーキが使用される場合、FET上にもっと平等に電力損失を分配するように駆動部のHighとLowの両方の側にPWMチャネルを用いることが望まれ得ます。けれども、殆どの応用でこれは必要とされません。

電流の流れを測定するのに単一のADCチャネルが使用されます。A/D変換器(ADC)は10ビットの分解能で外部の2.5V基準電圧を使用し、これは概ね2.4mVの精度を与え、そしてこれは0.22Ωの分圧(電流検出)抵抗上の電圧がそれを通して1A流れる時に220mVであるので、過電流検出に関して充分です。望むなら、ADCは与えられた採取周波数で、切り替えまたは継続的な走行でない時に電流を測定するためにPWMによって起動することができます。モータ速度を調整するための速度基準として使用されるアナログ(換言すると可変抵抗器)電圧を測定するのに2つ目のADCチャネルが使用されます。

ホール感知器出力は全てがレベル変化での割り込み(ピン変化割り込み)を特徴とするポートBの3つのピンに接続されます。ホール感知器出力がそれらの論理レベルを変えた場合に割り込みが実行され、新しいホール感知器出力に対応する整流(転流)状態が決まります。ポートBの最下位ピンがホール信号復号の速度最適化のため、意図的に使用されていることに注意してください。

使用される資源の概要が表1-1.で一覧にされ、より多くの詳細はソフトウェア資料(readme.html)で得られます。

UART,SPI,TWI通信に関するハードウェア資源が必要ならば未だ利用可能なことは言及する価値があります。通信(または他の周辺機能)に対して割り込みが使用される場合に、ホール感知器に対して増加される応答時間が考慮されるべきであることに注意してください。

表1-1. モータ制御に使用される資源

資源	使い方
ADC0,ADC4 (A/D変換器)	速度基準と電流の測定
PD3 (タイマ/カウンタ2:OC2B)	Low側駆動部制御(WL)
PD6,5 (タイマ/カウンタ0:OC0A,B)	Low側駆動部制御(UL,VL)
PD7,4,2	High側駆動部制御(UH,VH,WH)

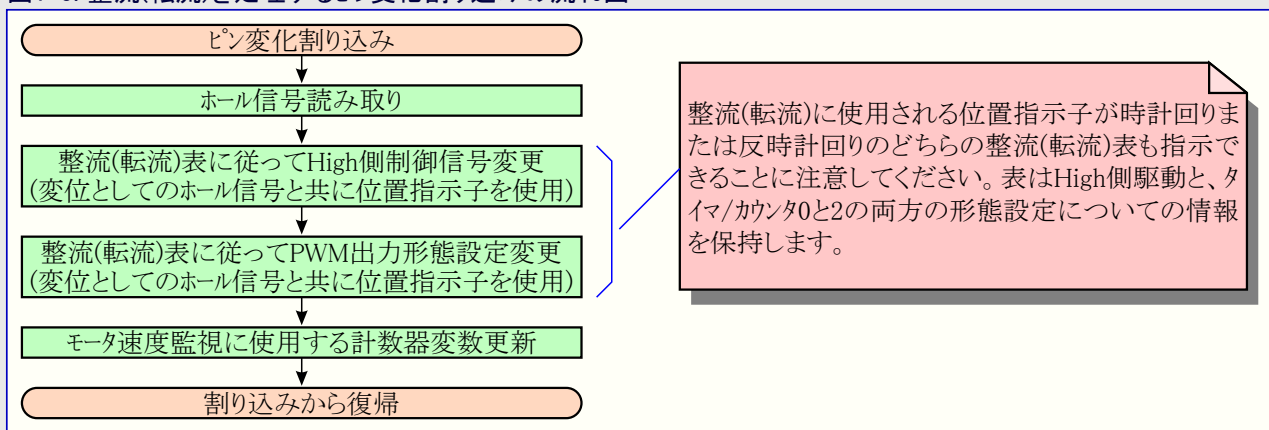
1.3. ソフトウェア説明

全てのコードは(4Kバイトまでのバイナリ出力で無料の)IAR™ EWAVR 4.12Aコンパイラを使用してC言語で実装されています。ソースコードはDoxygenを用いて資料化され、コード資料についてはソースコードと一緒に見つかるreadme.htmlファイルを参照してください。readme.htmlはHTMLに基づくコード資料を開きます。

最も重要な関数であるホール感知器出力での変化で整流(転流)変更を処理するピン変化割り込みルーチンは図1-5.で得られる流れ図によって記述されます。

整流(転流)を処理する割り込みの高速実行を保証するため、或る変数に対して実装がいくつかのレジスタを固定化することに注意してください。文字列処理用の標準ライブラリ関数が使用されなければ、コンパイラは固定化されたレジスタを稀に使用します。競合が現れる場合、標準ライブラリを再コンパイルすることによって処理することができます。

図1-5. 整流(転流)を処理するピン変化割り込みの流れ図



1.4. 現実装の性能

- 速度制御に於ける(PWM分解能によって制限される)8ビット分解能
- コード量は427バイトです。(コード量高最適化)
- ホール感知器信号変化に対する5μs以下の応答時間
- 概ね50CPU周期かかる(ホール入力)ピン変化割り込みルーチン。8MHzに於いて過電流制御と通信が考慮されなければ、これは原理的に最大1600krpm(8MHz ÷ (50周期 × 6整流(転流)状態) × 60秒/分)になります。

2. 改訂履歴

資料改訂	日付	注釈
2596A	-年-月	初版資料公開
2596B	2006年2月	Doxygen注釈の更新と修正
2596C	2013年7月	構文規則修正と新しい資料雛形

(訳補) 以下は改訂Bまでに記載されていた本実装で利用可能な関数の一覧です。

`void Init_MC_timers(void)`

タイマ/カウンタ0と2を位相基準(対称)PWM動作(訳注:試供例は高速PWM動作)で動くように初期化します。基本周波数は32kHzに設定されます(速度制御でのより低い分解能の犠牲で高くすることができます)。関数はタイマ/カウンタが同期して計数することも保証します。

`void Init_MC_Pin_Change_Interrupt(void)`

ホール感知器信号を感知するのに使用されるピンをピンのレベルが変化した(上昇と下降の両端)場合に割り込みを生成するように構成します。

`void Init_ADC(void)`

前置分周値4でA/D変換器を構成し、そしてこれはCPU周波数の52(13×4)分割の最大採取速度を意味します。速度設定点と分圧電圧のADC測定と共に、これは過電流検出のための2採取の反応時間を与えます。

`void Set_Direction(unsigned char direction)`

整流(転流)表位置指示子を時計回りまたは反時計回りの表のどちらかの点に設定します。先にモータの速度を減じることなく方向を変えることは推奨されず、完全に停止することが望まれます。

`void Set_Speed(unsigned char speed)`

PWM出力のデューティ サイクル、それによってモータの速度を制御するタイマ/カウンタ0とタイマ/カウンタ2の比較レジスタを更新します。使用される方法は全てのPWMチャンネルが同じデューティ サイクルで動くことを保証します。

`unsigned char Get_Speed(void)`

回転子の速度を返します。未実装。

`_interrupt void PCINT0_ISR(void)`

駆動部のLow側を制御するPWM出力と駆動部のHigh側を制御するI/Oを更新します。速度最適化の割り込みを保証するため、割り込みで使用される変数は(この目的だけに固定化され)予約されたレジスタに置かれます。更に、整流(転流)を行うのに必要とする情報は、変位としてホール感知器入力信号を使用して非常に効率的にアクセスすることができる表内に配置されます。この割り込みは図2-5の流れ図によって記述されます。

`void Release_motor(void)`

駆動段へ接続されたAVRからの出力を浮かせませます(開放します)。これはモータ コイル内に電流が流れないことを保証するために駆動部を禁止します。未実装。



Enabling Unlimited Possibilities®

Atmel Corporation

1600 Technology Drive
San Jose, CA 95110
USA
TEL (+1)(408) 441-0311
FAX (+1)(408) 487-2600
www.atmel.com

Atmel Asia Limited

Unit 01-5 & 16, 19F
BEA Tower, Millennium City 5
418 Kwun Tong Road
Kwun Tong, Kowloon
HONG KONG
TEL (+852) 2245-6100
FAX (+852) 2722-1369

Atmel Munich GmbH

Business Campus
Parking 4
D-85748 Garching b. Munich
GERMANY
TEL (+49) 89-31970-0
FAX (+49) 89-3194621

Atmel Japan G.K.

141-0032 東京都品川区
大崎1-6-4
新大崎勸業ビル 16F
アトメル ジャパン合同会社
TEL (+81)(3)-6417-0300
FAX (+81)(3)-6417-0370

© 2013 Atmel Corporation. 全権利予約済 / 改訂:2596C-AVR-07/2013

Atmel®, Atmelロゴとそれらの組み合わせ、AVR®, Enabling Unlimited Possibilities®とその他はAtmel Corporationの登録商標または商標またはその付属物です。他の用語と製品名は一般的に他の商標です。

お断り: 本資料内の情報はAtmel製品と関連して提供されています。本資料またはAtmel製品の販売と関連して承諾される何れの知的所有権も禁反言あるいはその逆によって明示的または暗示的に承諾されるものではありません。Atmelのウェブサイトに表示する販売の条件とAtmelの定義での詳しい説明を除いて、商品性、特定目的に関する適合性、または適法性の暗黙保証に制限せず、Atmelはそれらを含むその製品に関連する暗示的、明示的または法令による如何なる保証も否認し、何ら責任がないと認識します。たとえばAtmelがそのような損害賠償の可能性を進言されたとしても、本資料を使用できない、または使用以外で発生する(情報の損失、事業中断、または利益と損失に関する制限なしの損害賠償を含み)直接、間接、必然、偶然、特別、または付随して起こる如何なる損害賠償に対しても決してAtmelに責任がないでしょう。Atmelは本資料の内容の正確さまたは完全性に関して断言または保証を行わず、予告なしでいつでも製品内容と仕様の変更を行う権利を保留します。Atmelはここに含まれた情報を更新することに対してどんな公約も行いません。特に別の方法で提供されなければ、Atmel製品は車載応用に対して適当ではなく、使用されるべきではありません。Atmel製品は延命または生命維持を意図した応用での部品としての使用に対して意図、認定、または保証されません。

© HERO 2014.

本応用記述はAtmelのAVR443応用記述(Rev.2596C-07/2013)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。