

AVR498 : ATtiny261/461/861を用いた ブラシレスDC電動機の感知器なし制御

要点

- 感知器なし形態でのBLDC電動機制御
- タイマ/カウンタ1波形生成使用
- ハードウェア実装
- 外部速度基準
- コード例

参考文献

- [1] ATtiny261/461/861データシート
- [2] AVR496:ATtiny861使用ブラシレスDC電動機制御
- [3] AVR430:MC300ハードウェア使用者の手引き
- [4] AVR469:MC301ハードウェア使用者の手引き
- [5] AVR172:ATAVRMC320とATmega32M1を使うブラシレスDC電動機の感知器なし整流

1. 序説

この応用記述はATtiny861 AVR[®]マイクロコントローラを用いて感知器なし形態でブラシレスDC(BLDC)電動機制御を実装する方法を記述します。

この資料ではブラシレスDC電動機の動作原理の短い記述を与え、感知器なし形態でブラシレスDC電動機を制御する方法を詳述し、この応用記述で使われるATAVRMC301とATAVRMC300の基板の短い記述も与えます。

感知器なし整流(転流)はホール感知器を用いた感知器形態で駆動されるBLDC電動機に比べて、位置感知器、配線、コネクタの費用が省けます。ホール感知器なしで、電動機の組み立てが簡単化されます。これは電動機と系の費用を低減します。

ATtiny861のタイマ/カウンタ1を備えた高性能AVRコアは高速ブラシレスDC電動機応用の設計を許します。

ATtiny261/461/861デバイスにはピンとソースコードの全てが互換です。唯一の違いはメモリ量だけです。この応用記述はATtiny861の意向で書かれていますが、この資料でのATtiny861へのどの参照もATtiny261/461にも適用します。

2. 動作の理屈

この資料はブラシレスDC電動機の背後を詳細に説明しません。代わりに、感知器なし制御に重要な局面に集中します。感知器なし形態での3相ブラシレスDC電動機の紹介については[5]の応用記述を調べてください。

2.1. 塊整流(転流)

未接続にされたままの1つの巻線と2つの巻線電流の極性は回転子に関して異なる6つの位置を定義します。電流が現在の位置から次の位置へ回転子を引っ張るように電流を切り換えると、回転子は回ります。回転子の各位置は切り替え手順による巻線電流の構成設定と連携します。巻線は実効電圧値を提供するためにPWM部によって制御された高速スイッチ(電力MOS-FETなど)を通して給電されます。

塊整流(転流)の仕組みは図1.によって概説されます。各整流(転流)段階に対して、GNDに接続された1つの端子があり、1つの端子は電源に接続され、そして1つの端子は開放のままにされます(端子名はU,V,Wです)。GNDと電源への恒久的な接続は電動機の巻線を通して最大電流を駆動し、与えられた供給電圧で電動機負荷に与えられた可能な最大速度で回ります。



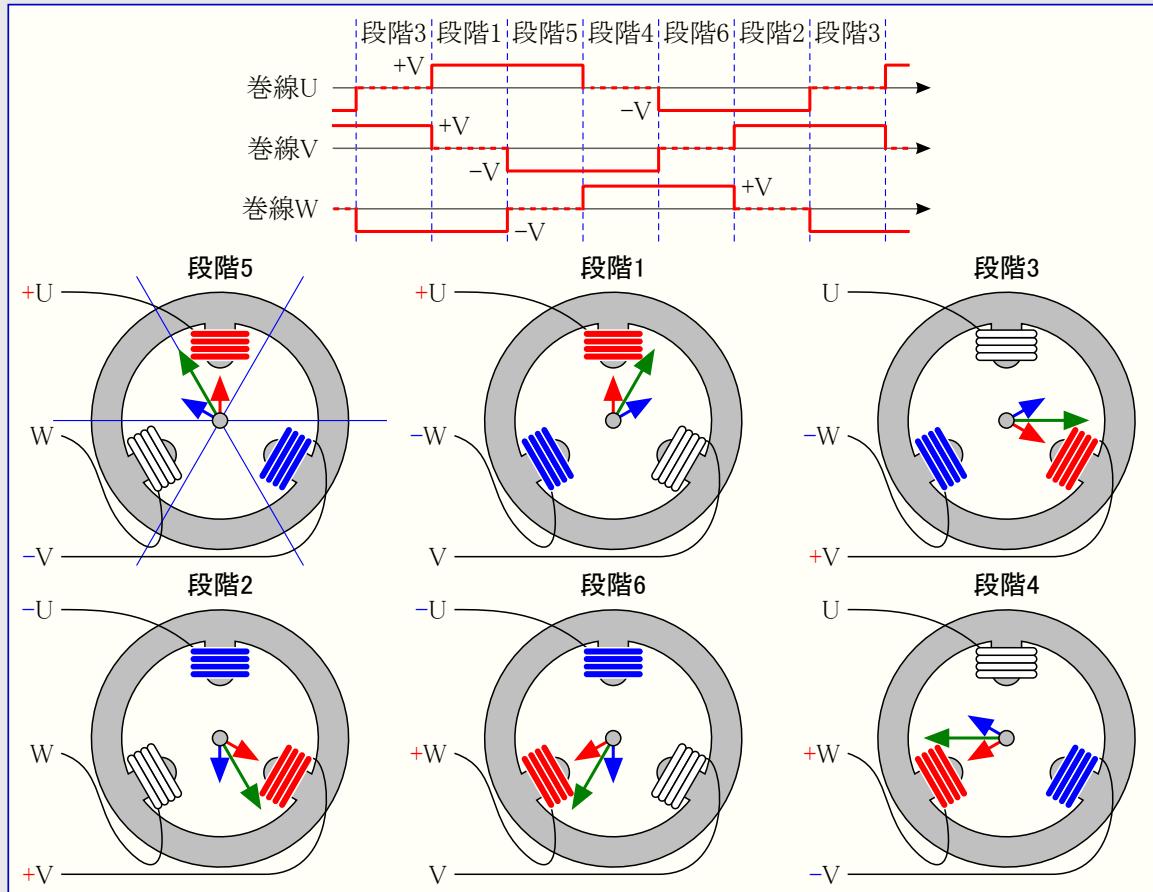
8ビット **AVR[®]**
マイクロコントローラ

応用記述

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、Atmel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。

Rev. 8192A-04/09, 8192AJ2-04/21

図1. 整流(転流)手順



注: 段階番号はホール感知器出力によって配給された値に従って定義されています。

塊整流(転流)に関しては、回転子の各扇状角が電流切り替えに関して連続する扇状角に割り当てられます。故に、ホール感知器信号の各変更が割り込みを強制するならば、割り込み経由の整流(転流)は簡単になります。そしてホール感知器信号の実際の組が整流(転流)扇状角を定義します。換言すると、塊整流(転流)は0がGNDへの接続、Zが開放端子を表し、そして1が供給電圧源への接続での0Z11Z0の周期的巡回として記述することができます。この手順は連続する各端子間で2段階遅らされます。123456の整流段階の手順は、U=Z00Z11、V=11Z00Z、W=0Z11Z0です。逆方向の654321回転については、U=11Z00Z、V=Z00Z11、W=0Z11Z0です。

電動機の巻線は星型(Y結線)または三角型(Δ結線)で接続することができます。どの接続形式であっても、考えはBEMFを測定できるように中立点へのアクセスを得ることで、いくつかの電動機は追加の線経由でこのアクセスを許します。中立点Nへの直接アクセスはBEMFの直接測定を許します。中立点Nの電圧は与えられるPWMの仕組みと共に供給電圧によって影響を及ぼされます。必要とされるなら、GNDに対する中立点Nの電圧は電氣的に再構成することができ、また異なるPWMの仕組みに関してはそれを計算することが可能です。

2.2. BEMF 対 ホール感知器

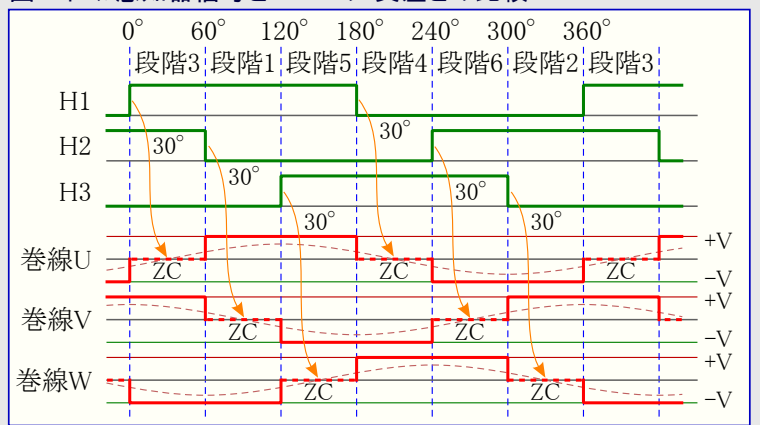
BLDC電動機の一般的に受け入れられる定義は、永久磁石同期電動機で見られる正弦状逆起電力に対立するものとして、台形逆起電力(BEMF)を持つ永久磁石電動機です。この応用記述は正弦状逆起電力を持つBLDC電動機に適用します。

代表的な正弦状逆起電力波形と3相BLDCの対応する駆動電圧は図2.で示されます。毎回の整流(転流)段階に於いて、1つの相の巻線が正電源に接続され、1つの相の巻線が負電源に接続され、そして1つの相は浮きです。浮いている相の逆起電力はそれが正と負の電源の平均を横切る時の“0交差”に帰着します。0交差は図2.でZCとして記されます。

0交差は2つの整流(転流)の丁度中央で起こります。低速または緩やかに変化する速度では、或る整流(転流)から0交差までの時間と0交差から次の整流(転流)までの時間は等価です。これはこの感知器なし整流(転流)制御の実装に対する基本として使います。

0交差が検出されなければならない浮いている相は毎回の整流(転流)段階毎に変わります。0交差を検出するのに各相の巻線に対して1つのADCチャネルが必要とされます。

図2. ホール感知器信号とBEMFの0交差との比較



2.3. 立ち上げ

逆起電力(BEMF)の大きさは電動機速度に直接比例します。これは信号対雑音比が非常に小さいため、低速での0交差検出を極端に難しくします。従って、始動と非常に遅い速度の間、この応用記述で提供される感知器なし整流(転流)の仕組みは動かないでしょう。ブラシレスDC電動機の感知器なし始動に関する多数の戦略が長年に渡って提案されています。これらは複雑さと計算の複雑さに於いて異なり、全てに合う1つの解決策とは思えません。更に、それらの始動方法の多くは特許取得済みです。

この応用で採用した方法は[5]の応用記述で記述されます。最初の数整流(転流)用の整流(転流)相互間遅延の表がフラッシュメモリに格納されます。この手順は逆起電力の帰還に留意せずに実行されます。そして制御は感知器なし整流(転流)制御部に渡されます。このむしろ簡単な方法は電動機負荷を先に知っている時に非常に上手く動きます。

整流(転流)相互間遅延は'delay_us'関数で整流(転流)計時器(タイマ/カウンタ)を用いて生成されます。他の始動方法が必要な場合は含まれているソースコード資料をご覧ください。

3. ATtinyX61マイクロコントローラ

3.1. ATtiny261/461/861での沈黙時間付きPWM信号生成

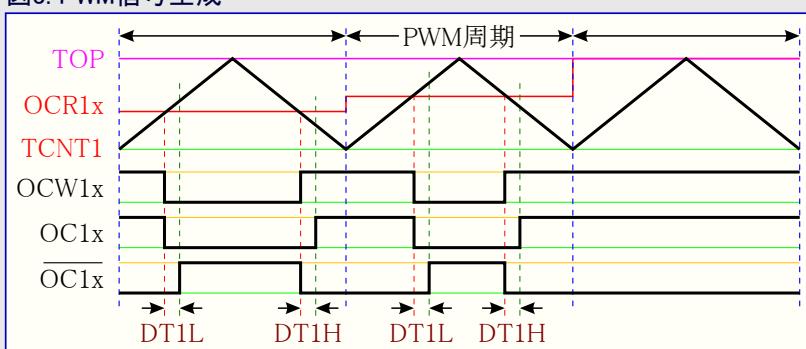
ATtinyX61系列のタイマ/カウンタ1(TC1)は3相電動機の駆動に対して非常に上手く適合します。それは64MHzのPLLで走行することができ、10ビットの分解能を持ちます。構成設定可能な沈黙時間を持つ3つの補完出力対に群化される、6つのPWM出力はこの計時器から生成することができます。"PWM6"動作形態はブラシレスDC電動機の塊整流(転流)に対して完璧です。最大安全性に関して、ハードウェア誤り保護部はCPUからのどんな介入もなしにPWM駆動部を禁止することができます。

3つの半ブリッジ駆動段を制御するために、TC1の"位相/周波数基準PWM動作"が使われます。この動作形態では、ハードウェア沈黙時間挿入を持つ3つの補完PWM出力対を生成することができます。これはまさに3つの半ブリッジ駆動段とPWM生成で選ばれたものとで3相正弦波駆動波形を生成するのに何が必要とされるからです。

3つの補完出力対の1つの動きは図3で見ることができます。計数器は上昇/下降計数動作形態で計数します。OCR1xレジスタが現在のデューティサイクルを指定します。図に於いてOCW1xとして記される中間波形は上昇計数時の比較一致で出力を解除し、下降計数時の比較一致で出力を設定することによって生成されます。この中間波形は、この波形から2つの出力を順に生成する沈黙時間生成器に供給します。OCW1xがHighになった後に指定した沈黙時間DT1Hが経過されるまでHighにならないのを除き、非反転出力OC1xはOCW1xに従います。OCW1xがLowになった後に指定した沈黙時間DT1Lが経過されるまでLowにならないのを除き、反転出力OC1xはOCW1xに従います。その結果が沈黙時間を持つ補完出力対です。

半ブリッジのデューティサイクルを制御するのに1つのレジスタOCR1xだけの変更が必要です。半ブリッジの平均出力電圧はこの値に比例します。

図3. PWM信号生成

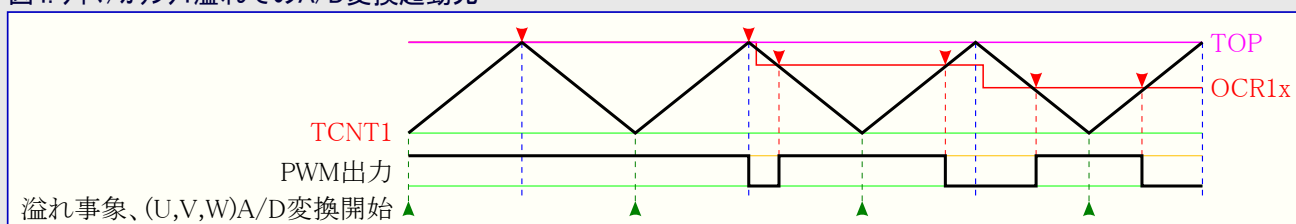


3.2. A/D変換起動

ATtinyX61のA/D変換器(ADC)単位部は10ビットの分解能と0~VCCの入力電圧範囲を持ちます。U,V,Wの3相はADCの3つのチャネルを通して測定されます。電圧基準入力A/D変換多重器選択(ADMUX)レジスタの基準電圧選択(REFS_n)領域を通して選択することができます。A/D変換制御/状態レジスタB(ADCSRB)のA/D変換自動起動要因選択(ATTS_n)領域を通して起動元を選択することができますので、この部分は電動機制御に対して完璧に適合されます。A/D変換測定をPWM信号に同期することが可能です。

事実、図4は計時器が0に達した時に溢れ事象が起こることを示します。この事象はA/D変換採取の自動起動に使うことができます。デューティサイクルが非常に低くない限り、これはPWM出力が長時間安定する点です。これはPWM切り替え雑音が低い時に浮いている相の電圧のA/D変換採取が起こることを保証するのに使われます。

図4. タイマ/カウンタ1溢れでのA/D変換起動元



3.3. PWM基本周波数

PWM基本周波数はタイマ/カウンタ分解能とクロック周波数によって制御されます。

タイマ/カウンタ1の分解能は比較レジスタC(OCR1C)の頂上(TOP)値設定によって制御することができます。位相/周波数基準PWM動作形態での動作時、各PWM周期中、計数器はTOP値まで上昇しそして0へ下降して計数します。この応用記述ではタイマ/カウンタ1の全10ビット分解能が利用され、2046計時器クロック周期のPWM周回周期を与えます。

タイマ/カウンタ1はシステム クロックまたは64MHzまたは32MHzの公称速度で走行する高速周辺機能クロックからクロック駆動されます。この応用記述では、可聴周波数範囲より十分上のPWM周波数を保証するために64MHzのクロック周波数が使われています。タイマ/カウンタ1の周波数は以下に於いて $f_{CLKT/C1}$ として参照されます。

タイマ/カウンタ1のクロック周波数の関数としてのPWM周波数は式1.から計算することができます。

式1. 計時器クロック周波数の関数としてのPWM基本周波数

$$f_{PWM} = \frac{f_{CLKT/C1}}{2 \times TOP - 2}$$

64MHzのタイマ/カウンタ1クロック周波数と10ビット分解能でのPWM周波数は従って31.28kHzです。

4. ハードウェア説明

この応用はATAVRMC300とATAVRMC301基板で開発され検査されています。

ATAVRMC300基板はブリッジを組み込む電力基板で、一方ATAVRMC301はATtiny861プロセッサ周辺を構成するプロセッサ基板です。

これら2つの基板の徹底的な説明の「AVR430:MC300ハードウェア使用者の手引き」と「AVR469:MC301ハードウェア使用者の手引き」を参照してください。これらの応用記述で回路図も利用可能です。

図6.はATAVRMC300基板で使われるATAVRMC301を用いたハードウェア組み立てを示します。

電力ブリッジ(Q1～Q6)は電動機DC電圧を調整するのにPWM信号によって変調されたUH,UL,VH,VL,WH,WLの6つの信号を通して制御されます。

速度基準は可変抵抗器で調整することができます。

図6. ATAVRMC301 & ATAVRMC300接続

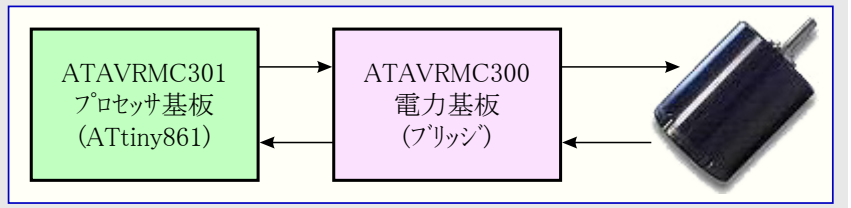
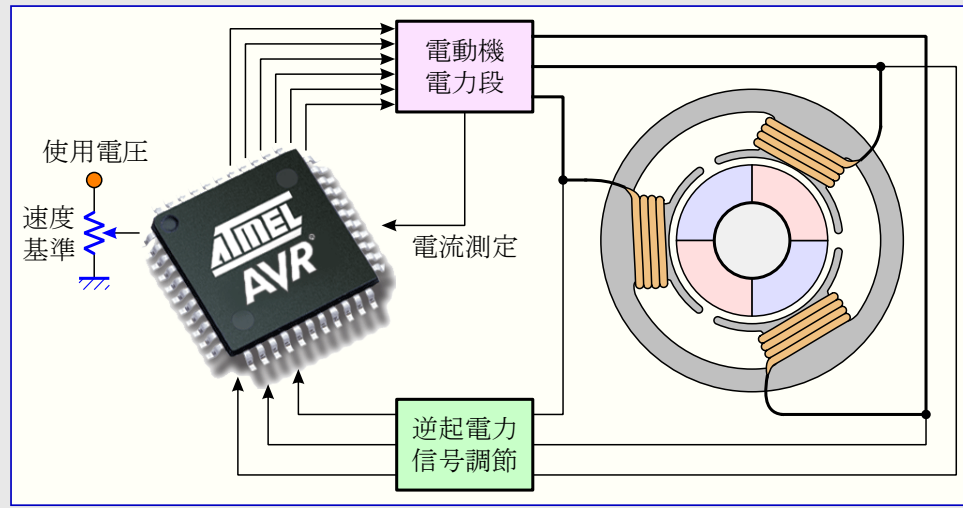


図7. 感知器なし制御構成



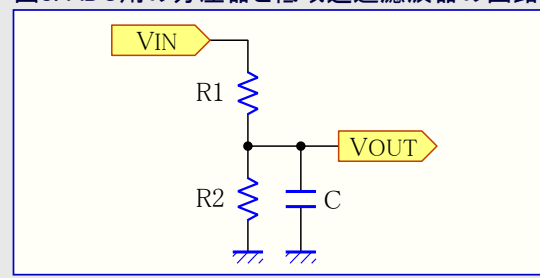
4.1. 分圧器/低域通過濾波器回路

設計の至る所で度々、受動分圧器と低域通過濾波器(VD/LPF)の回路が使われます。この回路の配置は図8.で示されます。

この回路の部品値は望むDC利得と低域通過濾波器カットオフ周波数に依存します。以下の所見が部品の選択を手助けするでしょう。

- 低い周波数に於いて、回路は通常に分圧器として動きます。 $V_{OUT}=V_{IN} \times (R_2 \div (R_1+R_2))$ です。換言すると、DC利得はR1とR2による分圧器のそれと等価です。
- 高い周波数に対しては、コンデンサCがこれらの周波数を絶えず濾波するGNDへの短絡として動きます。
- 濾波器的カットオフ周波数は次式によって与えられます。

図8. ADC用の分圧器と低域通過濾波器的回路



$f_c = 2\pi \times \text{Req} \times C$: 整流(転流)雑音を排除するために f_c はPWM周波数より低くあるべきです。

ここで、 $\text{Req} = (R_1 + R_2) \div (R_1 \times R_2)$

例: 10kHzのPWM周波数で、 $R_1=2.2\text{k}\Omega$ 、 $R_2=10\text{k}\Omega$ 、 $C_1=0.022\mu\text{F}$ の $f_c=4.01\text{kHz} < \text{PWM周波数}$

4.2. A/D変換基準電圧

0交差は浮いている相が2つの供給路の平均電圧を横切る時に起きます。この応用記述では負供給がGNDレベルと仮定され、電動機供給電圧の半分を0交差電圧とします。この電動機供給電圧依存性は固定の0交差閾値電圧の使用を非実用的にします。代わりにAREFピンに接続されるA/D変換基準電圧として電動機供給電圧(またはその縮小版)が使われます。電動機供給電圧はADCへ供給される前に低域通過濾波されることが必要です。この目的に図8.の分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)が使われるべきです。

AVR430資料を参照することによって、A/D変換の基準として V_{motor}' が使われます。最大基準電圧は0~2.56Vの範囲であるべきです。

現在の応用では、使われる電力ブリッジは12Vで給電されます。

故に、

$R_1=10\text{k}\Omega$
 $R_2=2.2\text{k}\Omega$ (回路図で実装されるべき)
 $C=0.022\mu\text{F}$
 $V_{OUT}=0.180 \times V_{IN}$ または $V_m'=0.180 \times V_m$

4.3. 逆起電力信号調節

3つの相電圧は3つの分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)を通してA/D変換器(ADC)へ接続されるべきです。ADCの全電圧範囲を利用するために、この分圧/濾波器はA/D変換基準電圧と同じDC利得を持つべきです。低域通過濾波器は逆起電力信号に対する著しい遅れなしに、可能な限り多くの高周波数雑音を濾波除去するように設計されるべきです。

電圧測定に関して、その値は次のとおりです。

$R_1=33\text{k}\Omega$
 $R_2=5.6\text{k}\Omega$
 $C=0.022\mu\text{F}$
 $V_{OUT}=0.145 \times V_{IN}$
 例えば、U信号が測定される場合、
 $U'=0.145 \times U$

4.4. 速度基準

この応用記述では速度基準としてアナログ信号が使われています。この速度基準はどんな信号、例えば温度感知器読み取りにもすることができます。この応用記述では単純な可変抵抗器回路が使われています。入力としての電動機供給電圧とAREFと同じ分圧で、R2抵抗器として可変抵抗器を使う図8.のような分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)は全ADC範囲が使われることを保証します。

4.5. 0交差閾値

A/D変換器(ADC)は10ビット分解能を持ちます。0交差検出中、ADC分解能の範囲の中央で閾値が検出されます。

この値は次のように検出することができます。

測定電圧 : $U'=0.145 \times U$
 基準電圧 : $V_m'=0.180 \times V_m$
 0交差閾値 $= ((U'/V_m') \times 1024) / 2 = 412$

4.6. ATtiny861接続

AVRと各種ハードウェア補助系間の接続が表1.で一覧にされます。ポートBの全ての信号はお互いに交換することができます。同じことがADCチャネルに通用します。

表1. ATtiny861接続

ATtiny861ピン	接続先	方向
AREF	電動機供給基準電圧(V_m')	入力
PB5	WH	出力
PB4	WL	出力
PB3	VH	出力
PB2	VL	出力
PB1	UH	出力
PB0	UL	出力
PA1	U相ADC入力(U')	入力
PA4	V相ADC入力(V')	入力
PA5	W相ADC入力(W')	入力
PA2	速度基準	入力

4.7. 周辺機能の用法

右の周辺機能部が使われます。

表2. 周辺機能の用法

周辺機能部	用法
タイマ/カウンタ1	PWM生成、A/D変換採取起動
タイマ/カウンタ0	整流(転流)タイミング
A/D変換器	0交差検出、速度基準入力

5. ソフトウェア説明

5.1. 前文

AVR498ソフトウェア一括と共にHTML資料が配給されます。これはソースフォルダに配置されたreadme.htmlファイルによって開くことができます。

ソフトウェア実装は次の3つの主要部分に分けられます。

- ・ 初期化と構成設定
- ・ 感知器なし整流(転流)制御
- ・ 速度制御

5.2. BLDC電動機制御実装

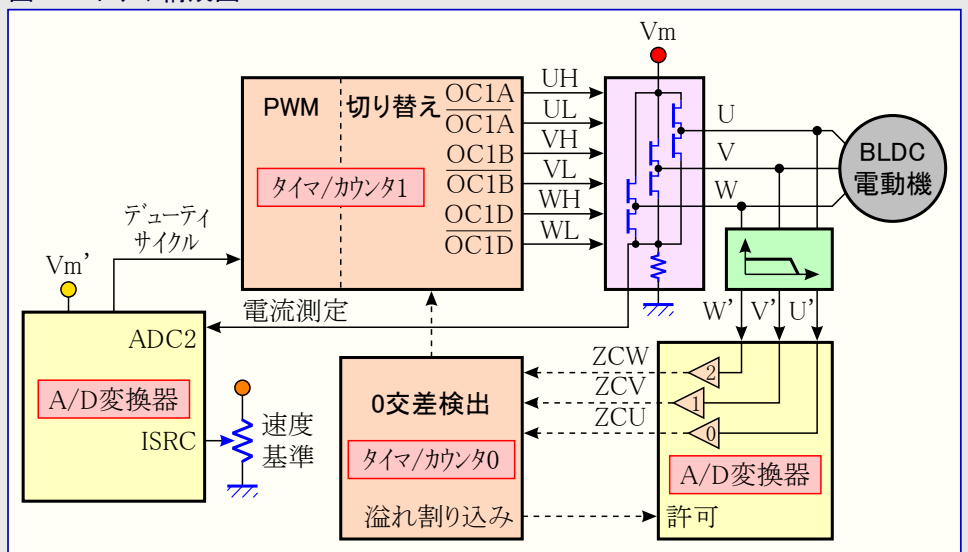
PWM出力を生成するのにタイマ/カウンタ1が使われます。タイマ/カウンタ1の比較一致部と沈黙時間発生器が6つの電力スイッチを駆動するための6つのPWM信号を提供します。

タイマ/カウンタ1溢れ割り込みはU,V,W相での0交差検出に使われます。

A/D変換器はデューティサイクルを設定するための可変抵抗器を測定し、そして調整繰り返し、またはTWI通信ポートを通して送られることによって監視され得る電流を測定します。

タイマ/カウンタ0は30°の区間を決めるのに使用されます。

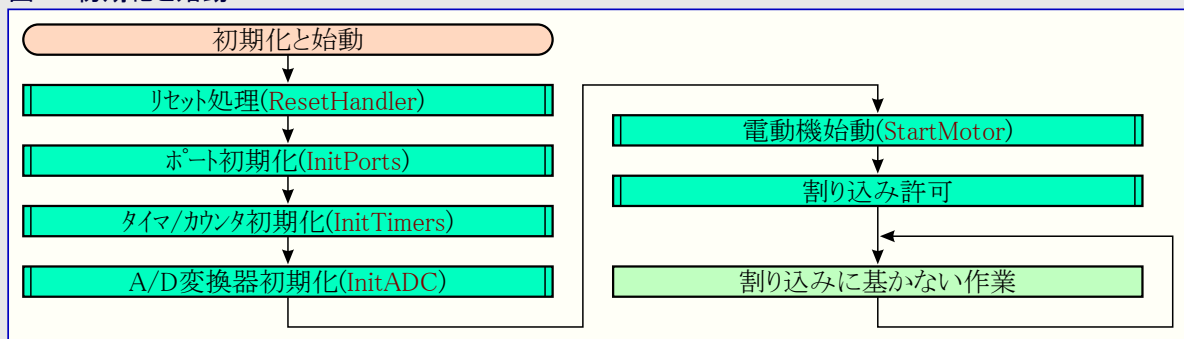
図9. ハードウェア構成図



5.3. 初期化と始動

初期化と始動部は全ての周辺機能を初期化し、開路で電動機始動手順を動かします。始動手順中、回転子の機械的な位置と割り当て時間中の電界間で整列が行われるべきです。立ち上げ手順が終わると、応用は感知器なし整流(転流)制御に切り替えます。同時に割り込みに基かない全ての作業を進行する無限繰り返しへ移行します。含まれる例でこのような作業は速度制御だけです。図10は初期化と始動に関する流れ図を示します。'割り込み許可'と記された部分は、感知器なし整流(転流)制御が割り込み駆動整流(転流)制御に手渡される点を記します。

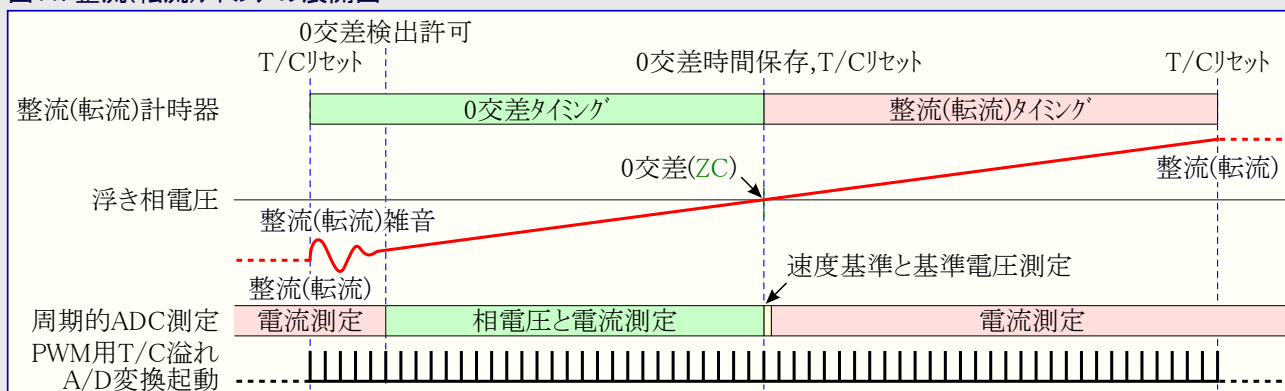
図10. 初期化と始動



5.3.1. 感知器なし整流(転流)

感知器なし整流(転流)がどう実装されるかを理解するため、2つの整流(転流)間で起こる事象のタイミングに目を通すことが有用です。図11は2つの整流(転流)間で浮いている相の電圧の展開図を示します。

図11. 整流(転流)タイミングの展開図



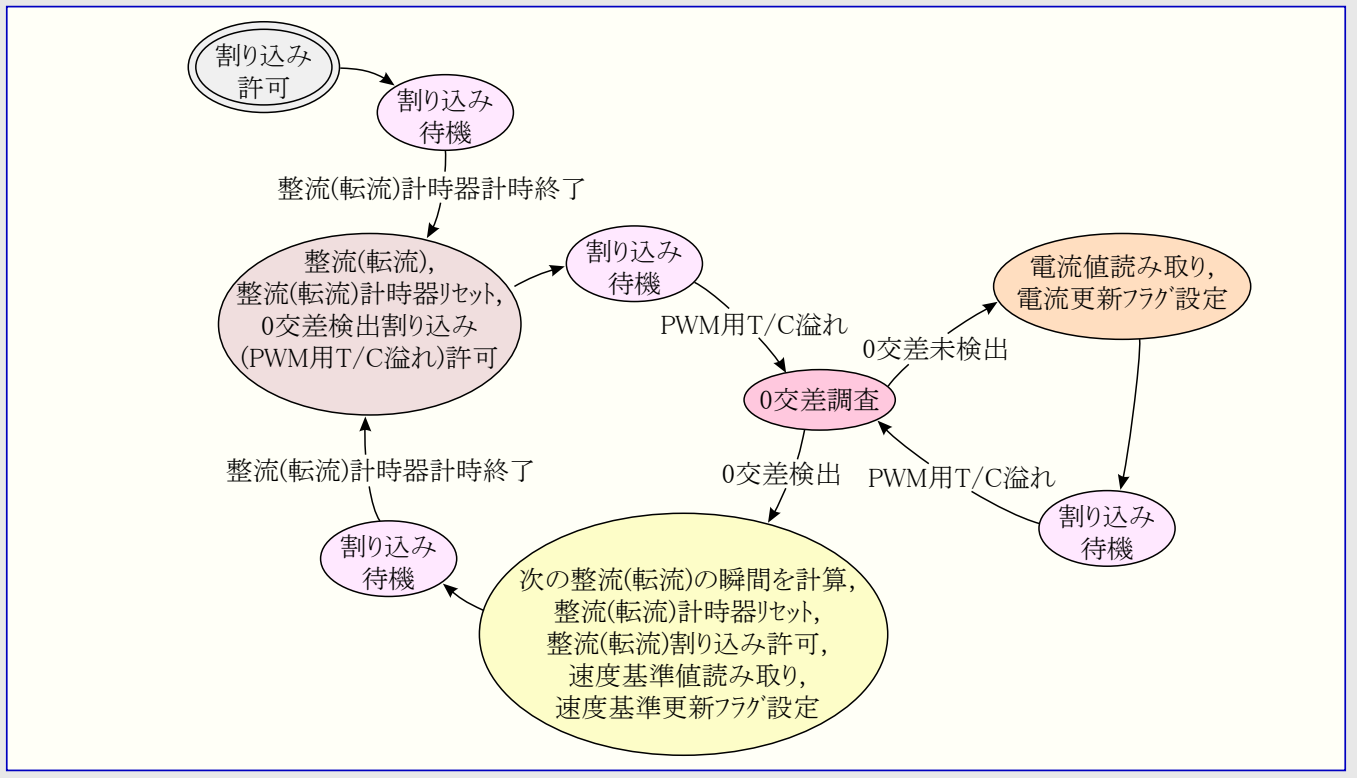
感知器なし整流(転流)制御は多数の割り込みを用いて実装されます。割り込みは整流(転流)周回の各種段階の間に許可され、そして禁止されます。表3は各割り込みの責務を示します。図12の状態遷移図は感知器なし整流(転流)を実行するために割り込みがどう連携するかを示します。

mainの無限繰り返しは状態機構が'割り込み待機'と記された状態の1つである時にいつも走行します。

表3. 割り込みの責務

割り込み	責務
タイマ/カウンタ0(PWM計時器)溢れ	0交差検出
タイマ/カウンタ1(整流(転流)計時器)比較A一致	整流(転流)タイミング

図12. 感知器なし整流(転流)状態機構



5.3.2. 速度と電流の制御

感知器利用不能での速度は整流(転流)制御部からの情報を用いて計算されなければなりません。整流(転流)制御部は全体変数に回転速度を計算するのにも用いられる整流(転流)と0交差間の時間を格納します。同時に新規の速度測定が利用可能なことを速度制御部に告げるフラグが設定されます。外部速度基準も丁度0交差検出後に採取され、このためにこれらの新鮮な測定が同時に利用可能です。

速度情報が逆起電力0交差毎にだけ更新されるため、更新の頻度は電動機速度に比例します。離散時間制御部のパラメータが間隔に依存するため、これは問題になり得ます。例えば、一定利得のP(比例)調整部を持つためには、現在の間隔に比例した利得パラメータが計算されなければなりません。もう一方の選択は固定値を用いて、速度で変化する制御部利得を受け入れることです。

分圧(電流検出)電圧はPWM周期毎、概ね50 μ s毎に採取されます。加えて、電動機供給電圧の変化に対して補償するために、毎回の整流(転流)段階に1度、外部固定基準電圧が測定されます。この固定基準電圧は電動機供給元から引き出されたAREF電圧を計算するのに使われます。一旦AREF電圧が分かると、分圧(電流検出)電圧、従って分圧(電流検出)抵抗を通る電流を計算することができます。

6. ATAVRMC300 & ATAVRMC301の構成設定と使い方

電力基板は12V 2AのDC電源で供給されなければなりません。

表4. ATAVRMC301ジャンパ設定

ジャンパ	位置	注釈
J9	UH,UL,VL	閉
J10	PA3,VM	閉
J11		開
J12		開
J13		開
J15	PA1,Ucond	閉
J16	PA4,Vocnd	閉
J17	PA5,Wcond	閉

7. 結び

この応用記述は感知器なしブラシレスDC電動機応用に対するソフトウェアとハードウェアの解決策を提供します。全てのソースコードはAtmelのウェブサイトで入手可能です。

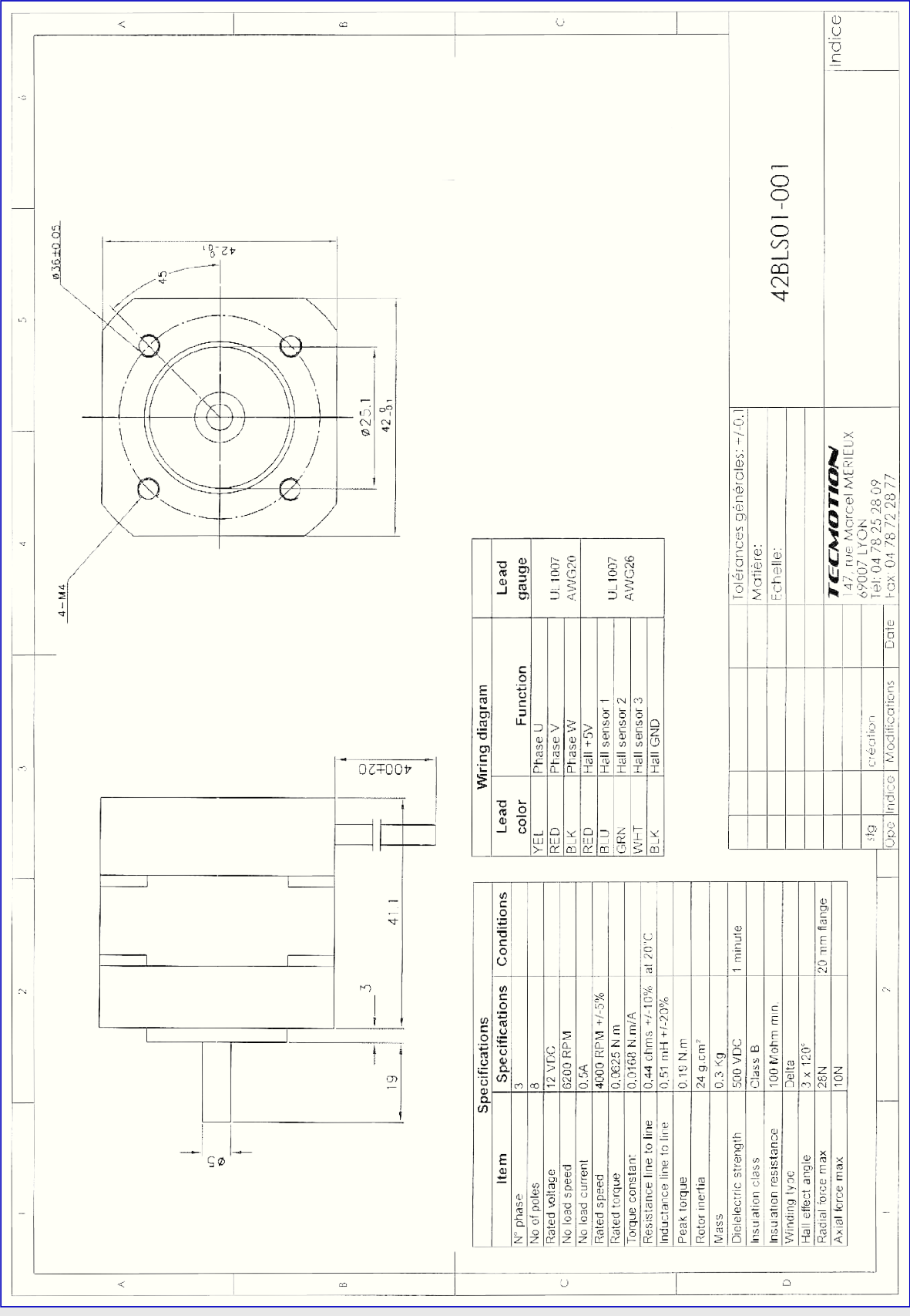
ソフトウェア ライブラリは感知器なし形態でどんな3相ブラシレスDC電動機も始動と速度を制御する関数を提供します。

ハードウェアは感知器なしブラシレスDC電動機に必要とされる最小外部部品での最小設計に基づきます。

ATtiny861 CPUとメモリの使い方はもっと複雑な応用を許すために十分低くなっています。

8. 追補

図13. 42BLS01-001電動機特性





本社

Atmel Corporation

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131
USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 487-2600

国外営業拠点

Atmel Asia

Unit 1-5 & 16, 19/F
BEA Tower, Millennium City 5
418 Kwun Tong Road
Kwun Tong, Kowloon
Hong Kong
TEL (852) 2245-6100
FAX (852) 2722-1369

Atmel Europe

Le Krebs
8, Rue Jean-Pierre Timbaud
BP 309
78054 Saint-Quentin-en-
Yvelines Cedex
France
TEL (33) 1-30-60-70-00
FAX (33) 1-30-60-71-11

Atmel Japan

104-0033 東京都中央区
新川1-24-8
東熱新川ビル 9F
アトメル ジャパン株式会社
TEL (81) 03-3523-3551
FAX (81) 03-3523-7581

製品窓口

ウェブサイト

www.atmel.com

技術支援

avr@atmel.com

販売窓口

www.atmel.com/contacts

文献請求

www.atmel.com/literature

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のウェブサイト位置する販売の条件と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、または利益の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。

© Atmel Corporation 2009. 不許複製 Atmel®、ロゴとそれらの組み合わせ、AVR®、STK®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。

© HERO 2021.

本応用記述はAtmelのAVR498応用記述(doc8192.pdf Rev.8192A-04/09)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。