

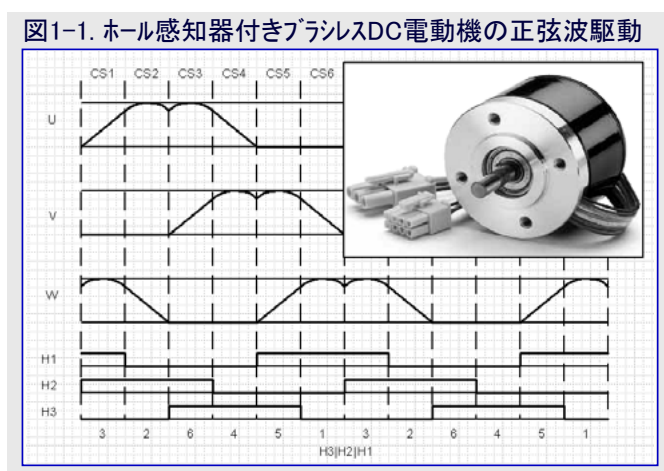
# AVR447 : ATmega48/88/168を使う 3相永久磁石電動機の正弦状駆動

## 要点

- 3相正弦波
  - ・ 電氣的な1回転に対して192段階
  - ・ 8ビット振幅分解能
- ソフトウェア沈黙時間生成
- ホール感知器による制御
- 正弦波振幅での実行時縮尺調整を通した速度制御
  - ・ アナログ入力からの速度基準
- 始動時電動機走行に対する自動同期
- 最初の整流(転流)段階に台形整流(転流)を使う安全な始動
- デジタル入力による方向制御
- 安全な停止と方向変更の手順
  - ・ 能動ブレーキまたは停止中の惰性停止
- 走行時に調節可能な進相整流(転流)角
- 逆転信号出力
- 回転速度(速)出力信号

## 1. 序説

この応用記述はホール感知器付き3相ブラシレスDC電動機用の正弦駆動の実装を記述します。この実装は第3高調波注入の正弦波のような他の駆動波形を使うように、容易に変更することができます。



## 2. 動作の理屈

文献の殆どに於いて、永久磁石電動機は逆起電力(電動機回転時に巻線に誘導される電圧)の形状に基き、2つの種類に分けています。逆起電力は形状に於いて台形状または正弦状のどちらかで有り得ます。例え文献全体を通して用語が一貫していなくても、多くの人はブラシレスDC(BLDC)電動機が台形状逆起電力を持ち、その一方で永久磁石同期電動機(PMSM)が正弦状逆起電力を持つことに一致すると思うようです。BLDCとPMSMの両電動機は正弦状電流によって駆動することができ、故にこの応用記述全体を通してそれらの間でどんな区別も行われません。代わりに、それら両方は永久磁石電動機またはPMMとして参照されます。



8ビット **AVR**<sup>®</sup>  
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. 8010A-06/06, 8010AJ3-04/21

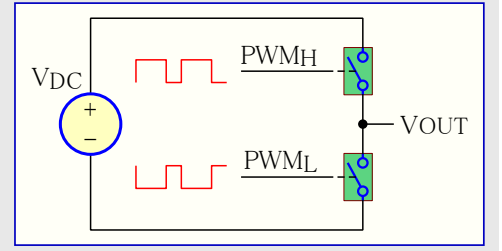
### 3. AVR®での実装

この応用記述は正弦状電流で3相PMMを駆動する方法を記述します。コード例はPWMを使って波形を生成する方法の一般的な参考基準としても使うことができます。

#### 3.1. 電圧生成

正弦状電流で3相電動機を駆動するために、各相に対して独立した電圧が生成されなければなりません。3相電動機用の駆動段は一般的に各端子に対して1つずつの3つの半ブリッジから成ります。各半ブリッジは2つのスイッチ、例えば2つの電力用MOSFETトランジスタから成ります。相電圧がどう生成されるかを理解するには、1つの半ブリッジを見ることで充分です。図3-1はDC電圧源に接続された1つの半ブリッジを示します。

図3-1. 半ブリッジを用いた電圧生成



##### 3.1.1. PWM

VOUT出力の平均電圧はPWMHとPWMLの2つの逆相パルス幅変調(PWM)信号を2つのスイッチへ印加することにより、0～VDC間で調整することができます。平均出力電圧はHigh側スイッチのデューティサイクルに比例します。この場合のVOUT出力は滑らかな電圧曲線ではなく、High側スイッチに印加されたPWM信号の形状と同じ方形波です。この信号が低域通過濾波器を通して供給されるなら、その出力電圧はHigh側スイッチのデューティサイクルに比例した電圧レベルでしょう。

多くの理由のため、電動機制御設計に於いて独立した低域通過濾波器を追加することは一般的ではありません。まず第一に、電動機は低域通過濾波器として働きます。巻線の抵抗分とインダクタンスが低域通過RL濾波器を形成します。更に、電動機の慣性と負荷が機械的な低域通過濾波器を形成します。PWM切り替え周波数を充分高く選ぶことが、回転子速度に於ける顕著な微細動をなくします。次に、小さな電動機ですらその巻線を通して注がれる電流は数Aの範疇になり得ます。例えばRC濾波器を通してこの電流を強いることは実質的な電力損失、エネルギー損失に終わるでしょう。

##### 3.1.2. 沈黙時間

MOSFETトランジスタのような切り替え用デバイスは瞬間的にONとOFFを切り替えることができません。再び図3-1の半ブリッジを考察してください。PWMHとPWMLのスイッチが逆相の信号で供給される場合、1つのスイッチがONするのと同じ瞬間で他のスイッチがOFFします。この遷移中、1つのスイッチが完全に閉じられず、同時に他方のスイッチも完全に開かれられない短い時間の区間があり、非常に低い抵抗で供給電圧とGND間を直結させ、トランジスタを通して流れる大電流を許してしまいます。この状況は貫通として知られ、ハードウェア保護が適切でなければ多分駆動段を破壊するため、これは避けられなければなりません。

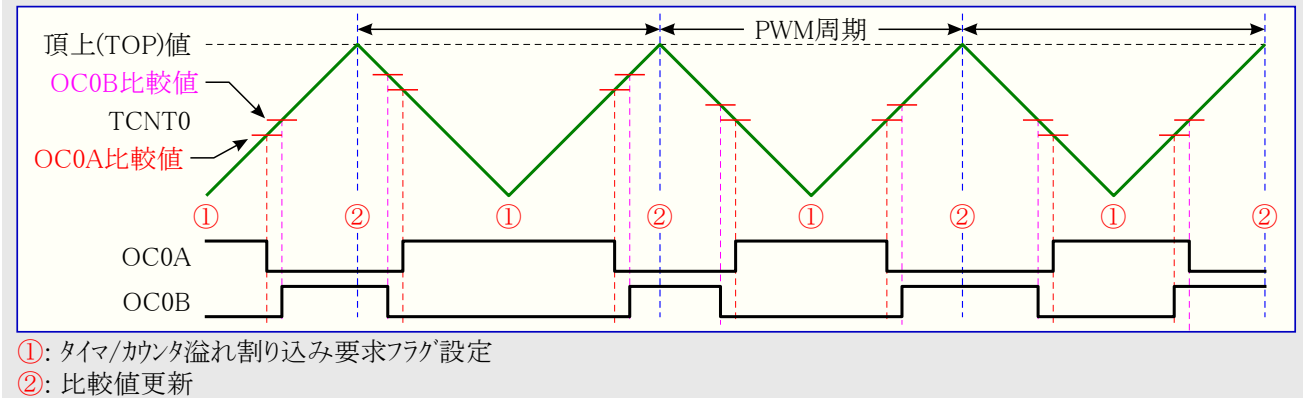
これに対する解決策は毎回のPWM遷移に関してHigh側とLow側のどちらのスイッチも導通でない小さな時間区間、沈黙時間を追加することです。

##### 3.1.3. AVRでの沈黙時間付きPWM信号生成

AVRでの沈黙時間付きPWM“電圧生成”の実装方法を理解するため、1つの相電圧だけで考察を続けます。例えばATmega48の1つのタイマ/カウンタ部は図3-1.のような1つ半ブリッジを制御するのに使うことができます。ATmega48のタイマ/カウンタ部は各々2つのPWM出力ピンを制御することができます。タイマ/カウンタ部はいくつかのPWM形態を持ち、出力ピンに関していくつかの構成設定任意選択があります。

沈黙時間付き半ブリッジ制御に対して、位相基準PWM動作が非常に良く適合します。計数器は沈黙時間を持つ中央整列PWM信号の生成を許す、両傾斜形態で動きます。望む信号を生成するためにタイマ/カウンタ0がどう構成され得るか示す図3-2.を考察してください。三角の線は両傾斜“位相基準動作”形態でのタイマ/カウンタ自身を表します。この例ではOC0A出力ピンが上昇計数時の比較一致で解除(0)、下降計数時の比較一致で設定(1)に構成設定されています。この出力は半ブリッジのHigh側スイッチに接続されます。同様にOC0B出力ピンは上昇計数時の比較一致で設定(1)、下降計数時の比較一致で解除(0)に構成設定されています。この出力は半ブリッジのLow側スイッチに接続されます。両出力に対する比較値が同じ値に設定された場合に2つの出力が補完(コンプリメンタリ)になることに注意してください。けれども、High側とLow側の駆動部の切り替え間に沈黙時間を挿入するため、比較値は各々の方向で少し移動されなければなりません。沈黙時間の半分がOC0A比較値から引かれ、同時に同じ量がOC0B比較値に加えられます。これは図3-2.でタイマ/カウンタ曲線上の短い赤の水平線によって図解されます。OC0AとOC0Bの波形から見ることでできるように、この効果は毎回のPWM切り換えで同じ長さの沈黙時間が挿入されることです。

図3-2. 沈黙時間付き補完PWM信号生成



比較値が変更される時の偶発の貫通(電流)を避けるため、OC0AとOC0Bの両方に対する比較値が正確に同時に更新されることが重要です。これは比較レジスタの2重緩衝とAVRのタイマ/カウンタ部の割り込み機能を通して達成されます。図3-2に於いて、各PWM周期は青の破線で記されます。位相基準動作で走行時、2つの出力に対する比較値は図3-2で②で記された瞬間から有効です。①と記された瞬間でタイマ/カウンタ溢れ割り込み要求フラグが設定(1)されます。これは比較値を更新することができる場所で周期的に割り込みを動かすのに使うことができます。16ビットタイマ/カウンタが使われるなら、計数器に対する頂上(TOP)値として捕獲レジスタを使うように構成設定することができます。そして比較値が更新されると同時に捕獲事象割り込みが起動されます。溢れ割り込みに代わる、この割り込みの使用は次の比較値を計算するのに利用可能なクロック周期を倍にします(訳補: 実際の比較レジスタ更新が②で行われるので、溢れ割り込みの①から次の②までの時間と比べ、捕獲割り込みの②から次の②までの時間が倍になり、この間に比較値計算を行うとの仮定でのことです)。本応用では全てのタイマ/カウンタ部が使われるため、捕獲事象割り込みが使われます。

### 3.1.4. PWM基本周波数

異なる比較値を持つ2つのPWM出力を生成するのに8ビットタイマ/カウンタ部が使われるとき、頂上(TOP)値は255に固定されます。16ビットタイマ/カウンタ部は8ビットタイマ/カウンタ部のように動かすため、8ビット位相基準PWM動作に設定されなければなりません。移動基準PWM動作では255の頂上(TOP)値を持つ1つのPWM周期が510 タイマ/カウンタクロック周期、またはクロック前置分周値1使用の仮定で510 CPUクロック周期の時間を持ちます。CPU周波数の関数としてのPWM周波数は式3-1から計算することができます。

式3-1. CPU周波数の関数としてのPWM基本周波数

$$f_{PWM} = \frac{f_{CPU}}{510}$$

## 3.2. 波形生成

3.1項の半ブリッジからの電圧出力を生成するためにAVRをどう構成するかからの情報を用いて3つの半ブリッジで電動機を駆動するシステムを構成することが可能です。

### 3.2.1. AVRの構成設定

ATmega48の各タイマ/カウンタ部は1つの半ブリッジを制御することができ、故に3つの半ブリッジを制御するのに3つ全てのタイマ/カウンタ部が必要とされます。各タイマ/カウンタ部は3.1項に従って1つの半ブリッジに接続され、そして構成設定されます。3つのタイマ/カウンタが異なる瞬間で始動されるので、3つのタイマ/カウンタが同期されることを保証するための値で各タイマ/カウンタが予め設定されます。例えばAVR Studio®のシミュレータで応用を走らせて3つのタイマ/カウンタレジスタ値を調査することによって、3つのタイマ/カウンタが同期されることが重要です。

### 3.2.2. 波形の生成

3つのタイマ/カウンタに対する比較値の計算には3つ段階が含まれます。

- ・ 望む出力値取得
- ・ 望む振幅への値の尺度調整
- ・ 沈黙時間の挿入

同期電動機駆動時の望む出力値は回転子位置の関数です。出力値は計算されるか、または参照表に格納されるかのどちらかで有り得ます。この応用記述では応用の性能を増すために、値を格納する参照表が用いられます。

値は最大出力振幅に従って参照表に格納されます。参照表の値は望む出力振幅に対して縮尺されなければなりません。式3-2は出力値がどう縮尺され得るかを示します。出力デューティサイクル( $d_0$ )は参照表から得られた値( $d_{table}$ )を縮尺計数( $k_s$ )で乗算することによって得られます。

式3-2. 振幅縮尺式

$$d_0 = \frac{k_s \times d_{table}}{2^n}$$

出力ビット分解能は $n_0 = n_k + n_t - n_1$ として計算でき、ここでの $n_0$ 、 $n_k$ 、 $n_t$ は各々出力、縮尺係数、表値の分解能で、 $n$ は式3-2に於ける除数の指数です。例えば8ビットの表値、8ビットの縮尺係数、除数の指数に於ける8ビットの分解能は8ビット分解能を持つ出力デューティサイクル値を生成します。

3.1.3項で記述されるように沈黙時間が挿入され、その比較値はタイマ/カウンタの比較レジスタに出力することができます。回転子の位置に対して正しい値で出力を更新するために、これらの段階手順がタイマ/カウンタ溢れ毎に繰り返されます。

### 3.3. 正弦波生成

3.2項は参照表に格納された任意の波形を生成する方法を説明します。本項では正弦波出力を生成する効率的な方法が説明されます。

#### 3.3.1. 出力様式

最も素直な近接手法は単に参照表へ正弦波を格納し、各電動機端子で正弦波を生成するのにこの表を使います。けれども電動機駆動に関しては正弦状信号を生成するもっと効率的な方法があります。これを理解する鍵は各電動機端子に関してGNDに対する正弦状信号を生成しようとしないことです。生成しようとするのは、それら間で $120^\circ$ の位相移動を持つ3つの正弦状線間電圧(2つの端子間の差電圧)です。表3-1と表3-2は各端子に対して完全な正弦波を生成することなく、これがどう成し遂げられ得るかを示します。線図表現は代表的なブロック(台形状)整流(転流)様式と共に図3-3で示されます。

表3-1. 端子と線間電圧(正転)

段階	U	V	W	U-V	V-W	W-U
S1-S2	$\sin(\theta)$	0	$-\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$
S3-S4	$-\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta-120)$	0	$\sin(\theta)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$
S5-S6	0	$-\sin(\theta)$	$\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$

表3-2. 端子と線間電圧(逆転)

段階	U	V	W	U-V	V-W	W-U
S1-S2	$\sin(\theta)$	$-\sin(\theta-120)$	0	$\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta)$
S3-S4	$-\sin(\theta-240)$	0	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta)$
S5-S6	0	$\sin(\theta-240)$	$-\sin(\theta)$	$\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta)$

この近接手法には2つの利点があります。まず最初に、生成される最大線間電圧が純粋な正弦波近接手法よりも高くなり、より高いトルクと速度を提供します。次に、各端子出力は時間の1/3の間が0で、電力段での切り替え損失を減らします。

#### 3.3.2. 参照表の構造

参照表の構造はアクセス時間と参照表容量間の交換条件です。図3-3の波形を考察すると、多くの方法で情報を“圧縮”できることが分かります。

3つの波形は $120^\circ$ 位相移動され、故に1つの波形だけを格納して3つ全ての端子電圧に対してそれを使うことが可能です。更に位相Uに関して波形を考察すると、S3-S4段階はS1-S2の(左右)反転版です。S5-S6では単にUが0です。これは表の1/3ほどの小ささで格納し、正しい値を得るためにソフトウェアを使って上手く成功することが可能なことを示唆します。先の方法では正しい場所に対する参照表位置指示子補正でいくらかの付随作業があります。後の方法にはより大きな付随作業があります。

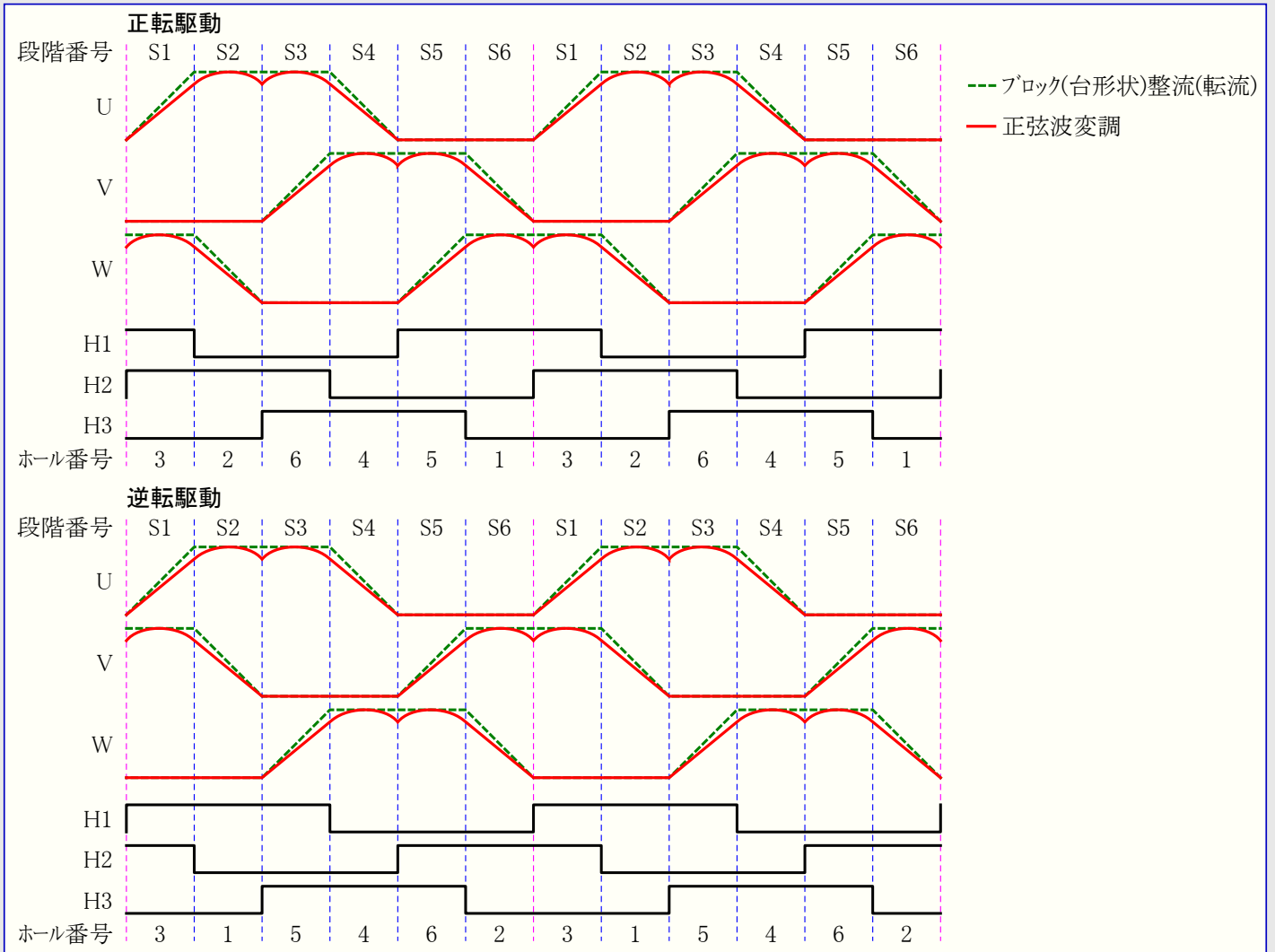
表参照がPWM周期毎に3つ全てのチャネルに対して実行されなければならないので、小さな付随作業でさえ、平均CPU負荷に対して重要な一因になり得ます。この応用記述は性能に注目し、このために3つ全ての端子電圧に対する波形が参照表に格納されます。可能な最高速アクセスを保証するため、値は表3-3で示されるように構成されます。これは読まれるべき3つの値全てに非常に速いLPM Z+命令を許します。正転駆動に対する出力値を得るには表がU,V,Wの順で読まれ、一方逆方向ではU,W,Vの順で使われます。

表3-3. 正弦参照表構造

U0	U0-120°	U0-240°	U1	U1-120°	U2-240°	~
----	---------	---------	----	---------	---------	---



図3-3. 正弦波生成



### 3.4. タイミング

ATmega48で利用可能な全てのタイマ/カウンタがPWM生成に使われます。この理由のために速度測定に利用可能な専用計時器はありません。これに対する解決策は基本時間としてタイマ/カウンタ部の溢れ割り込みを使うことです。各溢れ割り込み間の時間間隔は'tick'として参照されます。1tickの間隔はPWM時間間隔と等価で、これは式3-3によって与えられます。

#### 式3-3. PWM時間間隔

$$T_{PWM} = \frac{1}{f_{PWM}} = \frac{510}{f_{CPU}}$$

例として8MHzのCPUクロックでの1tickは63.75μsの間隔があります。

### 3.5. 位置感知器とその使い方

目標が同期電動機を制御することなので、電動機に同期された波形を生成するために回転子の位置についての或る種の情報を知らなければなりません。この情報は例えば回転符号器を使うことによって得ることができます。けれども、多くの永久磁石電動機は60°増加で回転子位置についての情報を提供する備え付けの3つのホール感知器が装備されています。この応用記述では位置感知装置だけとしてホール感知器が使われます。

図3-3.に於いて3つのホール感知器はH1,H2,H3として示されます。ホール感知器入力はそれらをH3,H2,H1として整理した2進値としてホール感知器信号を扱うことによって1~6間の番号に変換します。H3,H2,H1の各種組み合わせに対応するホール値が図3-3.で示されます。

ホール感知の状態とホール感知器変化のタイミングは多くの目的に使われます。

- ・ 出力波形位相固定化閉路
- ・ 速度計算
- ・ ブロック(台形状)整流(転流)
- ・ 回転検出
- ・ 同期化と方向変化
- ・ 進相整流(転流)角制御
- ・ 回転速度(タコ)出力信号

### 3.5.1. 位相固定化閉路

波形生成の到達点は回転子の回転に同期した出力波形を保つことです。位置感知器としてホール感知器を使う時の難問は回転子位置についての更新情報が60°毎にしか利用できないことです。この難問を解決するため、出力波形を回転子との同期(状態)に保つ位相固定化閉路(PLL)が実装されなければなりません。

参照表に対する指標(または位置指示子)は常に保持されます。ホール感知器から得られた情報がこの指標の更新に用いられます。

最も正確な位置情報はホール感知が値を変更する時の正確な瞬間で利用できます。この点で回転子の正確な角度が分かります。

ホール感知器変化間の時では回転子の位置についての情報が利用不能です。けれども、最後のホール感知器変化での回転子位置が分かっており、そして2つのホール感知器変化間の最後の時間間隔を測定することができます。これは回転子の速度計算を許し、一定速度との仮定で式3-4.から位置を計算することができます。

#### 式3-4. 位置補間法

$$\dot{\theta} = \omega \quad \theta(t) = \theta_0 + \omega t$$

ここでの $\theta$ は角度位置、 $\theta_0$ は最後のホール感知器変化での角度位置、 $\omega$ は角速度、 $t$ は最後のホール感知器変化からの時間です。

詳細抜きで式3-4.は式3-5.で示される差分方程式によって近似することができます。

#### 式3-5. 角度変位差分方程式

$$\theta[k] = \theta[k-1] + \omega T$$

ここでの $\theta$ は角度位置、 $k$ は現在の時刻印、 $\omega$ は角速度、 $T$ は段階時間です。

この応用記述では表での段階を測定する参照表指標によって角度位置が表されます。時間はtickで測定されます。角速度は式3-6.によって定義されます。

#### 式3-6. 角速度定義

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

ここでの $\Delta\theta$ は時間間隔 $\Delta t$ 間の角度変位です。角度変位が表での段階で測定され、そして時間がtickで測定されるため、角速度の単位はtick当たりの表での段階数です。

参照表の指標はtick毎に1度更新され、故に式3-5.の段階時間は1tickです。従って2つの連続するホール変化間で表を繰り返すのに使われる増加量は式3-7.で計算することができます。

#### 式3-7. 参照表指標増加量計算

$$i = \omega T = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \times T = \frac{n_e}{n_T}$$

ここでの $n_e$ は(60°回転)の整流(転流)段階当たりの表の要素数、 $n_T$ は最後の2つの整流(転流)間のtick数です。

毎回のtickで位置情報を更新するために参照表の指標に増加量が加算されます。

従って位相固定化閉路実装に使われる方法は次のように要約することができます。

1. 毎回のホール感知器変化に於いて、
  - ・ 回転子位置に対応するように参照表の指標を設定します。
  - ・ 式3-7.で指標増加量を計算します。
2. 次のホール感知器変化まで毎回のtickに対して、
  - ・ 式3-5.を用いて参照表の指標を更新します。
  - ・ 参照表の指標に従ってPWMデューティサイクルを更新します。
3. ホール感知器変化時に1.へ戻ります。

### 3.5.2. 速度計算

閉路速度制御が必要とされるなら、電動機の回転速度が計算されなければなりません。3.5.1項で説明されたように、速度情報は既に参照表増加量値の形式で計算されています。速度についての情報を得るために複雑で重い他の計算を更に行う必要はありません。速度についての情報を持つ別の変数を更にもつ必要もありません。これが既に利用可能な速度情報に直接対応するため、増加量と同じ単位の速度制御部設定点のように別の速度値で表現することによって資源を節約することができます。

速度を或るRPM値に制御するために、この値は最初に対応する増加量に変換されなければなりません。従って回転速度と増加量の関連を知る必要があります。1分当たりの回転数での速度(RPM)は式3-8で示されるようにホール感知器変化間のtick数に関連します。

#### 式3-8. RPM計算

$$\omega_{RPM} = 60 \times \frac{\frac{1}{6} \times f_{CPU}}{510 - n_T}$$

次のように速度の関数としてホール感知器変化間のtickを与えるために再整理します。

#### 式3-9. RPM計算

$$n_T = \frac{60 \times f_{CPU}}{6 \times 510 \times \omega_{RPM}}$$

式3-7と式3-9の組み合わせは速度(RPM)の関数として次のように指標増加量を与えます。

#### 式3-10. RPM計算

$$i = \frac{n_e \times 6 \times 510}{60 \times f_{CPU}} \times \omega_{RPM}$$

### 3.5.3. ブロック(台形状)整流(転流)

始動段階の間、2つの連続するホール感知器変化が検出されるまで回転子の速度は未知です。強靱な始動を保証するために回転速度が分かるまでブロック整流(転流)が使われます。ブロック整流(転流)形態動作時、6つ全てのPWM出力が同じデューティサイクルで操作され、駆動されるべきピンに対してだけPWM信号の出力を許可することによって整流(転流)が制御されます。出力様式はホール感知器変化毎に更新されます。ホール感知器入力に対応する出力様式を保持するため、各方向に対して1つの表が使われます。ブロック整流(転流)でのPWM駆動のより多くの情報についてはAVR443応用記述を参照してください。ホール感知器入力に関してブロック整流(転流)動作で使われる出力様式は正弦状様式と共に図3-3でも図解されます。

### 3.5.4. 回転検出

ホール感知器変化の流れは実際の回転方向を判断するのに使うことができます。各ホール感知器値に対して次に予想されるホール感知器値を格納するのに各方向に対して1つの表が使われます。これは実際の回転方法をその経緯から推測するのに使われます。

実際の回転方向を指示された回転方向と比較することで電動機が望む方向で回っているかどうかを判断します。

### 3.5.5. 同期と方向変更

マイクロコントローラが電源投入またはリセットされる時に電動機は既に回っているかもしれません。従ってファームウェアは電動機の状態を判断してその状態に同期することが重要です。

回転方向を変更する時に回転子はそれが逆方向で駆動され得るのに先立って停止されなければなりません。電動機が停止する前に方向指示が再びもう一度変更された場合、電圧を端子へ印加する前にファームウェアは再同期しなければなりません。

同期と調整はホール感知器によって制御されます。方向情報は3.5.4項で記述されるようにその経緯から推定されます。

電動機は最後のホール感知器変化から十分なtick数が経った時に停止と見做されます。

同期は電動機が指示された方向で回り、ホール感知器変化が最低2回検出された時に生じ(確立)します。

### 3.5.6. 進相整流(転流)制御

設定変更可能な進相整流(転流)角度は、回転子角度を導く出力波形の位相を補正するのに使うことができます。これは最大の速度や効率での電動機走行を得るために必要かもしれません。進相整流(転流)角度は走行時に調整可能で、例えば回転子の速度や波形の振幅に応じて変わるように構成することができます。進相整流(転流)角度は参照表の指標に変位(オフセット)を加えることによって達成され、従って波形の位相を移動します。進相整流(転流)角度は1参照表段階(1.8°)単位の増加量で調整することができます。

### 3.5.7. 回転速度(タコ)出力信号

回転速度(タコ)出力信号は各ホール感知器変化に対して極性を反転する信号を生成するために、ホール感知器入力から直接的に生成されます。

### 3.6. 過電流検出

回転子固定化、急激な負荷変動、速い加速は電動機と駆動段を通して流れる過大な電流を引き起こし得ます。過電流のための損傷を防ぐため、常に電流を監視することが非常に重要です。通常、駆動段のトランジスタとGND間に分圧抵抗器が装備され、電流を計算するのにこの分圧抵抗器が測定されます。これはA/D変換器(ADC)またはアナログ比較器で行うことができます。

この応用記述では電流測定にADCが使われます。ADCの使用は変換時間のために小さな遅延を持ち込みますが、他に利点があります。アナログ比較器は常にON(有効)で、このために重厚な外部濾波が追加されなければ、PWM切り替え雑音に対して非常に敏感になります。この問題はADCでの克服がより簡単です。電圧は或る一瞬で採取され、そしてこの瞬間は測定が毎回のPWM周期の同じ瞬間で行われるのを保証するため、例えばPWM計時器の溢れ事象(図3-2.の①点)によって起動することができます。デューティサイクルが非常に低くなければ、この瞬間はどのPWM切り替えからも遠く離れます。その結果は信頼に足る電流測定をするために外部の濾波を必要としないことです。

### 3.7. 速度制御

この応用記述は開路速度制御とPID制御器の両方の例を含みます。望むなら別の種類の速度調整器を追加することも可能です。回転子の実際の速度を計算する方法は3.5.2.項で網羅されました。

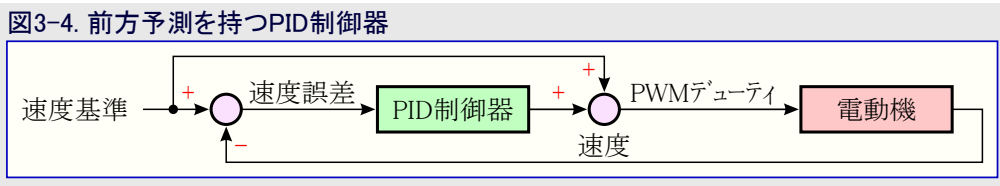
#### 3.7.1. 速度基準

開路または閉路のどちらの制御器にしても、或る種の速度基準が必要です。この応用記述ではアナログ基準電圧が使われ、とは言え例えばUART命令で容易に交換することができます。アナログ(速度)基準はA/D変換器(ADC)を用いて測定されます。

#### 3.7.2. 速度制御部

含まれるファームウェアを開路または閉路の速度制御で動かすことが可能です。開路速度制御は非常に単純です。生成される正弦波に対する8ビット振幅値として8ビットのアナログ速度基準値が直接使われます。

閉路速度制御も振幅設定に対する前方予測値として8ビットアナログ速度基準を使います。加えて、速度が望む速度に対して正確に制御されるのを保証するために、PID(比例、積分、微分)制御器が使われます。速度制御器用の設定点としてA/D変換測定が使われます。速度の内部表現が指標の増加量なので、測定された信号は同じ表現に変換されなければなりません。3.5.2.項がRPMでの速度と内部指標増加量表現の関連を網羅します。前方予測を持つ閉路系の構成図は図3-4.で示されます。



速度制御繰り返し部は単に割り込み駆動でない電動機制御応用の一部です。これは電動機制御の性能を落とすことなく割り込みルーチンの内側で実行するにはPID計算が長くかかりすぎるからです。更に、各整流(転流)で頻繁に制御繰り返し部を動かす必要はありません。

## 4. 速度制御

この応用記述と共に含まれるソースコードはコードの全ての部分を説明するDoxygen注釈で完全に資料化されています。“[readme.html](#)”ファイルを開くことで、完全なDoxygen資料をHTML形式でアクセスすることができます。

この節は本実装の全体の流れを理解するのに必要な付加情報を含みます。

### 4.1. コード構造

この応用記述と共に含まれるソースコードが高性能用に書かれていることに注意してください。このため、コンパイラに可能な限り多くのコードの最適化を許すため、殆ど全てのソースコードが1つのファイルに含まれます。殆どの関数が割り込みルーチンから呼ばれるため、それらは“`#pragma inline=forced`”擬似命令で宣言されます。

### 4.2. 使用周辺機能

この応用記述で使われるATmega8のハードウェア周辺機能が表4-1.で一覧にされます。

表4-1. 使用ハードウェア周辺機能

ハードウェア周辺機能部	使い方
タイマ/カウンタ0	U相のPWM変調
タイマ/カウンタ1	V相のPWM変調
タイマ/カウンタ2	W相のPWM変調
A/D変換器	速度基準入力, 電流測定
ピン変化0群割り込み	割り込みでの緊急停止
ピン変化1群割り込み	ホールセンサー変化割り込み
ピン変化2群割り込み	方向変更割り込み



### 4.3. 割り込みで実行される作業

速度制御を除く完全な電動機制御応用は割り込みに基きます。表4-2は応用で使われる各割り込みの責務を示します。各割り込み処理ルーチンの責務を理解することは応用がどう動くかを理解することの鍵です。

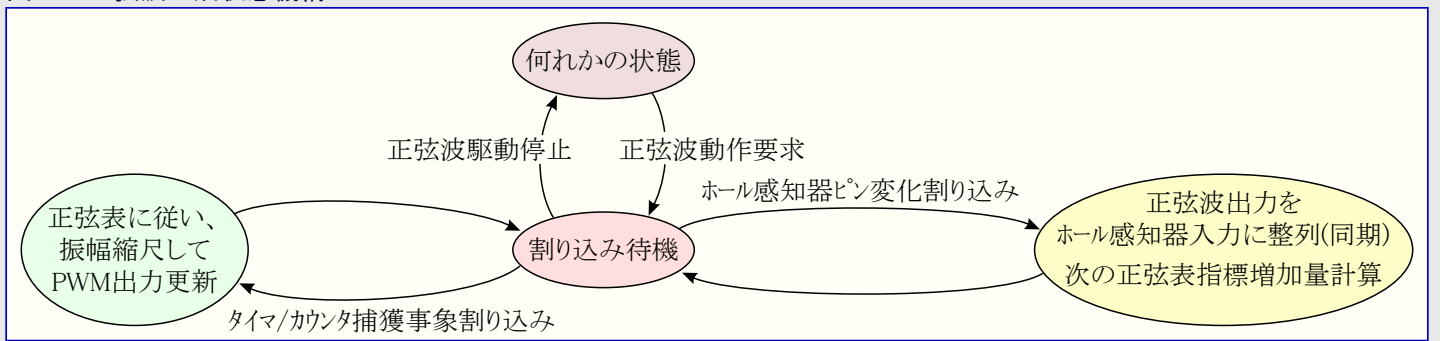
表4-2. 割り込みの責務

割り込み	関数	責務/作業
タイマ/カウンタ1捕獲事象	Timer1CaptureISR	PWM比較値更新, ブロック整流(転流)デューティサイクル制御, 速度測定, 停止検出
ピン変化0群	EmergencyInterruptISR	外部(緊急)停止信号処理
ピン変化1群	HallChangeISR	正弦波をホール感知器に同期, ブロック整流(転流), 回転速度(タコ)出力更新, 実際の方向検出, ファームウェアと電動機が同期しているかを検出, 逆回転出力信号更新, 正弦表指標増加量計算, 停止検出
ピン変化2群	DirectionInputChangeISR	方向制御入力
A/D変換完了	ADCCompleteISR	正弦波振幅/ブロック整流(転流)のデューティサイクル制御, 電流測定, ADCチャンネル選択

### 4.4. 出力波形生成

正弦波出力を生成するのに2つの割り込み処理ルーチンが連携します。Timer1CaptureISRはPWM周期毎に1度、PWM比較値を更新します。HallChangeISRは正弦波を現在の回転子位置に同期して、正弦表の指標増加量を計算します。図4-1はこの2つの割り込み処理ルーチン間の相互作用を示します。'何れかの状態'と記された状態は電動機が何かの状態にあるまたはなることに関連していないことの象徴化です。

図4-1. 正弦波生成状態機構



### 4.5. 方向と同期の制御

#### 4.5.1. 関連するフラグ

方向と同期の制御を説明するために次の2つの定義が必要とされます。

**Synchronized**は方向入力ピンによって指示された方向で回転する時に指定数の連続するホール感知器入力予測される様式に対応することを意味します。これは正しい周波数、位相、方向で正弦波駆動が印加されるのを保証するために使われます。

**Stopped**は指定tick数の間にホール感知器入力のどれにも変化がなかったことを意味します。

**FastFlags**全体変数の一部である2つのフラグは電動機が正しく同期及び停止されているかどうかを示します。これらのフラグは或る事象で割り込み処理ルーチンにより、自動的に操作されます。これらのフラグは以下の関数/割り込み処理ルーチンが以下のように更新します。

#### CommutationTicksUpdate

- 最後のホール感知器変化から予め定義されたtick数が過ぎた場合に、`motorStopped=TRUE`
- `motorStopped`がTRUEに設定された場合直ぐに、`motorSynchronized=FALSE`

この関数はTimer1CaptureISRによって呼ばれます。

### MotorSynchronizedUpdate

- 同期判定基準に合った場合に、`motorSynchronized=TRUE`
- 同期判定基準に合わない場合に、`motorSynchronized=FALSE`

この関数は`HallChangeISR`によって呼ばれます。

### HallChangeISR

- `motorStopped=FALSE` (ホール感知器が値を変える場合、電動機は停止で有り得ません。)

### DirectionInputChangeISR

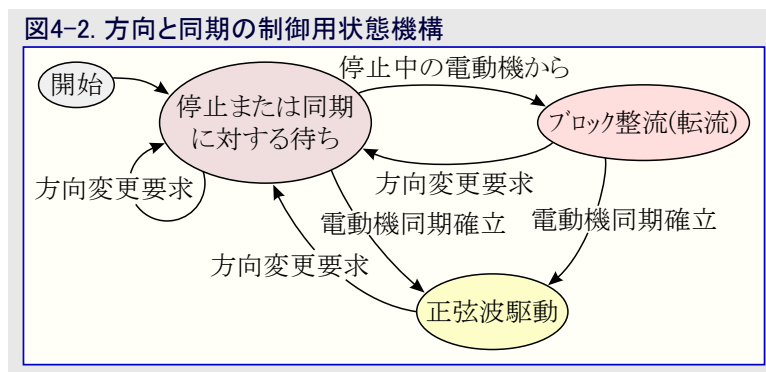
- `motorSynchronized=FALSE`
- `motorStopped=FALSE`

## 4.5.2. 方向と同期の論理

どの波形が印加されるのにも先立って電動機制御ファームウェアが電動機に同期されるのを必要とする、以下のような様々な状況があります。

- 電動機が停止から始動される時は最初にブロック整流(転流)用いて整流(転流)されます。整流(転流)は同期が得られるまで使われず。これは電動機が正弦波駆動に切り換わる時に正しい周波数と位相で正弦波が生成されることを保証します。
- 電動機が既に動いていてマイクロコントローラが始動される時は、それが電動機に同期する、または回転子が停止に切り換わるまで、ファームウェアはどんな駆動波形も印加しません。
- 方向変更が要求された時は駆動が禁止されるか、または電動機が停止されるまでブレーキを開始します。(更に逆の)別の方向変更が要求された場合、電動機は再び同期できるかもしれません。その場合は電動機の停止を待つことなく、正しい周波数で正弦波駆動を再開します。

方向と同期の完全な制御は図4-2で図解されます。停止された電動機は`motorStopped`フラグがTRUEであることを意味します。同期された電動機は`motorSynchronized`フラグがTRUEであることを意味します。要求された方向変更は`DirectionInputChangeISR`が動いていることを意味します。



## 4.6. A/D変換

含まれているコード例では速度基準と電動機電流の2つの値を読むのにA/D変換器(ADC)が使われます。ADCは一度に1つのA/D採取を実行する能力があるだけで、故に入力チャンネルはラウンドロビン形式で転換されます。

入力値の採取(A/D変換)は毎回のタイマ/カウンタ0溢れで自動的に起動されます。これは採取が各PWM周期の中央で起き、各電流測定(値)がその最後に於いて比較可能にすることを保証します。

A/D変換完了時、A/D変換完了割り込み処理ルーチンが走行し、変換された値が現在選択されているADCチャンネルに対応する全体変数に置かれます。タイマ/カウンタ0溢れ割り込みが実行されないのなら、タイマ/カウンタ0溢れ割り込み要求フラグは手動で解除(0)されなければなりません。このフラグが解除(0)されるまで、次のA/D変換は起動されません。

もっと入力が必要とされるなら、周回に対してもっと読み取りを追加するようにA/D変換完了割り込み処理ルーチンを拡張することができます。

含まれているソースコードでは電動機電流入力が全体変数に格納されるだけであることに注意してください。電流制限が個別設計用に指定されるため、電流制限または過電流停止に関するコード全体を通してどの場所でも使われません。

## 5. ハードウェア

本章はこの応用記述で使うためのハードウェア接続方法を記述します。

### 5.1. ピン割り当て

この応用記述で使われるピン割り当ては図5-1.で示されます。各ピンの機能は表5-1.で記述されます。

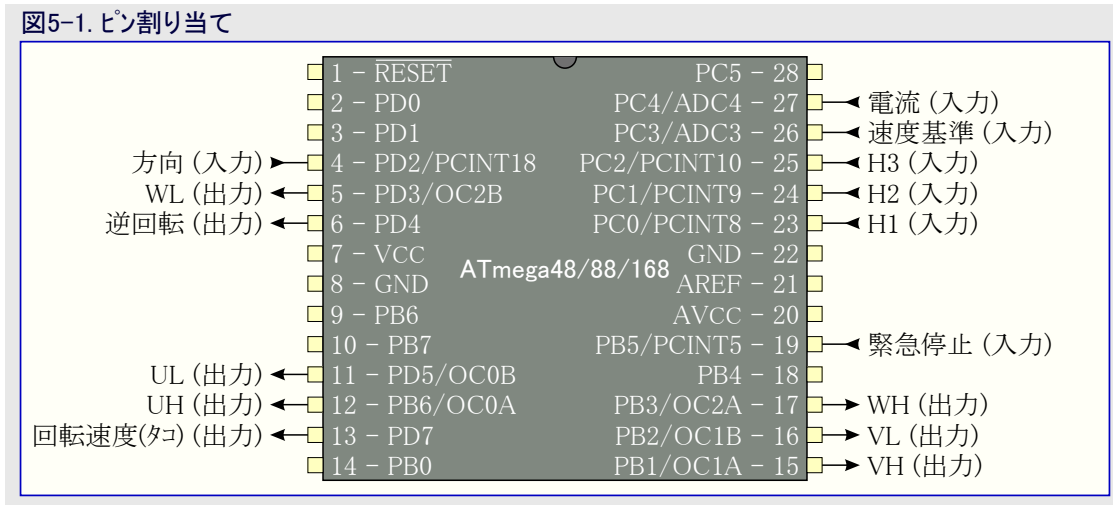


表5-1. AVRピンの使い方と方向

ピン名	信号名	目的	方向
PD5	UL	U相Low側制御信号	出力
PD6	UH	U相High側制御信号	出力
PB2	VL	V相Low側制御信号	出力
PB1	VH	V相High側制御信号	出力
PD3	WL	W相Low側制御信号	出力
PB3	WH	W相High側制御信号	出力
PC0	H1	ホール感知器信号1	入力
PC1	H2	ホール感知器信号2	入力
PC2	H3	ホール感知器信号3	入力
PC3	速度基準	波形の振幅を制御するアナログレベル (0~1.1V範囲の信号を予定)	入力
PC4	電流	電動機電流測定 (0~1.1V範囲の信号を予定)	入力
PB5	緊急停止	本ピンの論理値変化時に割り込み処理ルーチン(EmergencyInterrupt)が呼ばれます。	入力
PD2	方向	L=正転、H=逆転	入力
PD4	逆回転	L: 電動機は'方向'入力によって指定された方向で回転 H: 電動機は指示と逆方向で回転、または停止	出力
PD7	回転速度(タコ)	電動機の電氣的な周回数の3倍の周波数の方形波を出力	出力

## 5.2. 駆動段と電動機へのATmega48/88/168接続

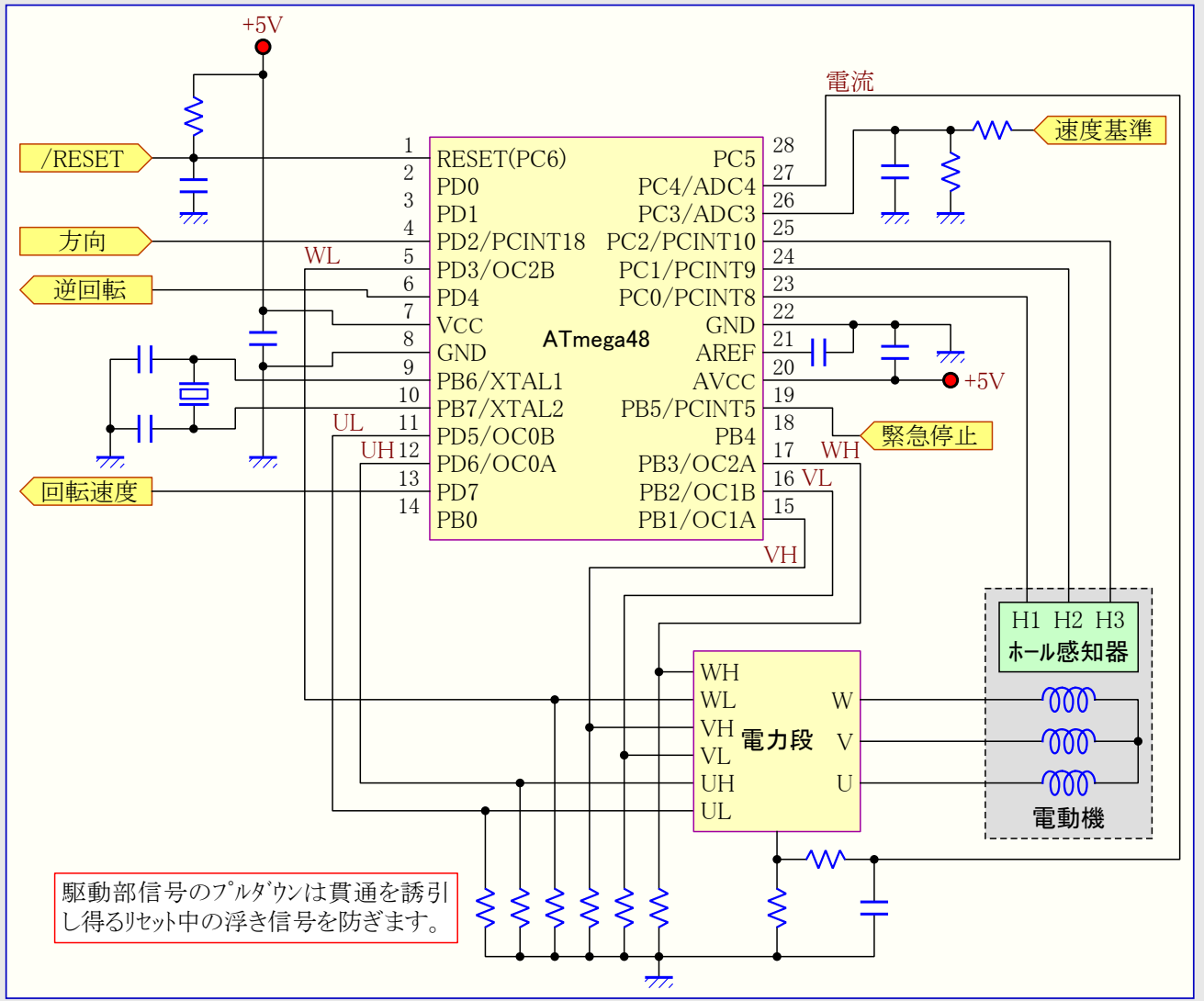
この応用記述は動かすのに次の部品が必要です。

- ・ ホール感知器付きの3相永久磁石電動機
- ・ 電動機を駆動する能力を持つ駆動段
- ・ AtmelのATmega48/88/168マイクロ コントローラ
- ・ 0~1.1V範囲のアナログ入力信号(速度制御用)

図5-2.は全体システムの概念的な回路図を示します。

例え'緊急停止'と'方向'の信号が不要でも、含まれるファームウェアを動かすために固定の論理レベルに接続されるべきであることに注意してください。

図5-2. 全体システムの概念的な回路図



### 5.2.1. ATAVRMC100駆動段の使用

この応用記述はATAVRMC100電力段/電動機開発キットで試験されました。ATAVRMC100は基板上に装着されたAT90PWM3マイクロ コントローラを持ちますが、基板上のEXT\_DRVとSENSORのインターフェースを通して違うマイクロ コントローラと共に電力段として使うことが可能です。EXT\_DRVヘッダはAtmelから入手可能なATAVRMC100ハードウェア使用者の手引きで資料化されています。違うマイクロ コントローラと共にATAVRMC100を使う前に、1つのマイクロ コントローラだけが信号を駆動することを保証するために、AT90PWM3を消去することが重要です。

表5-2.はATAVRMC100基板に接続されなければならない信号の完全な一覧を含みます。GND信号が分圧負端子に接続され、実際にはこれがGNDに直結されることに注意してください。図5-3.はEXT\_DRVヘッダの図的表現を示します。

表5-3.はホール感知器とのインターフェースに必要な接続を示します。このインターフェースの図的表現が図5-4.で示されます。



表5-2. ATAVRMC100 EXT\_DRV接続

信号名	ATmega <sup>x</sup> 8ピン	ATAVRMC100信号名	EXT_DRVピン番号
UH	PD6	H_A	1
UL	PD5	L_A	2
VH	PB1	H_B	3
VL	PB2	L_B	4
WH	PB3	H_C	5
WL	PD3	L_C	6
電流	PC4	V shunt+	7
GND	GND	V shunt-	8

図5-3. EXT\_DRV接続

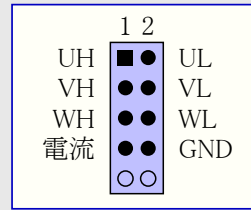


図5-4. ホール感知器接続

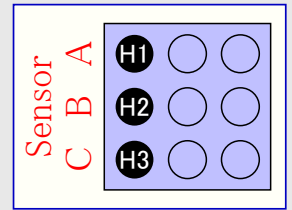


表5-3. ATAVRMC100ホール感知器インターフェース

信号名	ATmega <sup>x</sup> 8ピン	ATAVRMC100信号名
H1	PC0	Sensor A
H2	PC1	Sensor B
H3	PC2	Sensor C

## 6. 波形図

図6-1.と図6-2.は異なる速度で正転及び逆転の駆動時に生成される波形を示します。波形を滑らかにするためオシロスコプの平均機能が使われています。両図共、上からU,V,Wに対する相電圧、U-Vの線間電圧、そしてホール感知器のH1,H2,H3を示します。

図6-1. 750RPMでの正転駆動

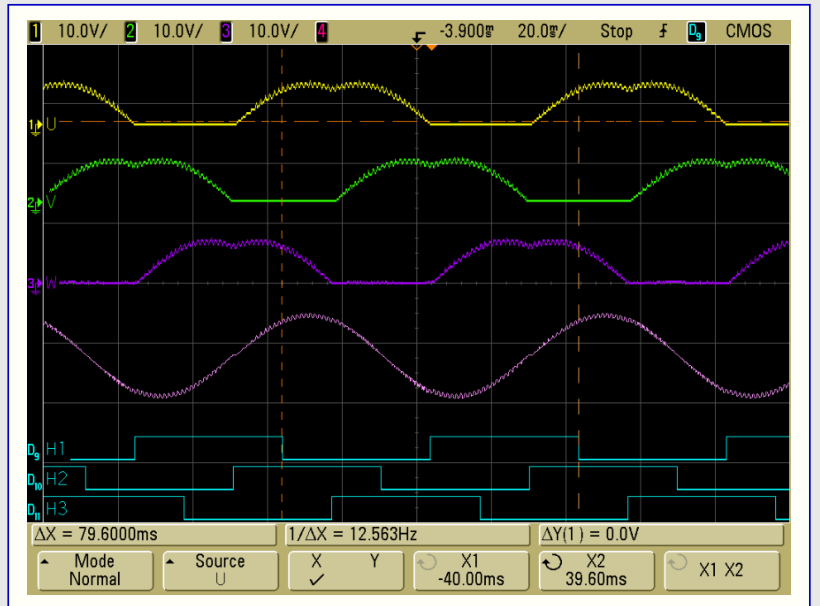
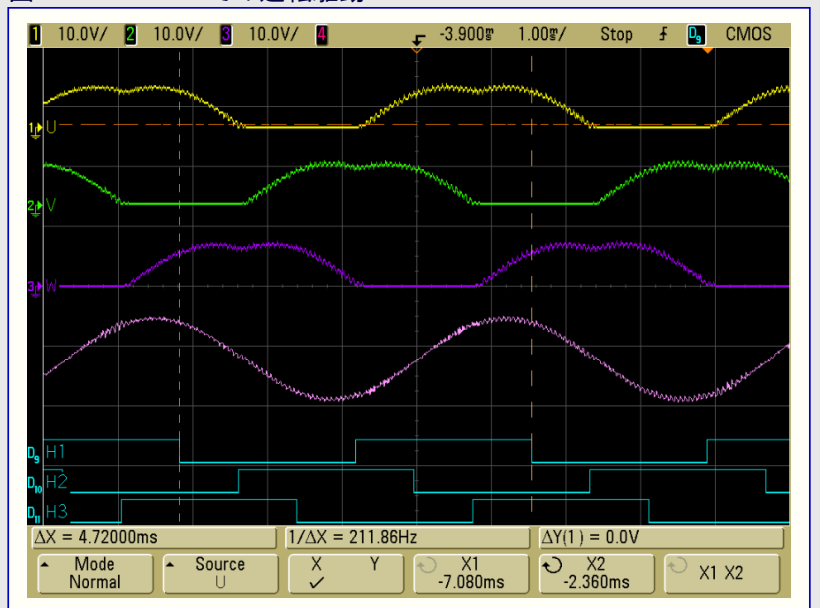


図6-2. 12660RPMでの逆転駆動



## 7. コード量と性能

表7-1. はフラッシュメモリとSRAMの使用状況を示します。フラッシュメモリ使用数が参照表によって専有された900バイト近くを含むことに注意してください。

表7-1. フラッシュメモリとSRAMの使用量

制御方法種別	フラッシュメモリ	SRAM
開路速度制御	～2.6Kバイト	～70バイト
PID速度制御	～3.5Kバイト	～90バイト

## 8. 参考文献

1. 1998年McGraw-Hill発行、Valentine, R著、「電動機制御電気工学ハンドブック(Motor control electronics Handbook)」
2. 2006年2月Atmel発行、「ATAVRMC100ハードウェア使用者の手引き 改訂B」  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7551.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7551.pdf)



## 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

## 製造拠点

### Memory

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131, USA  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 436-4314

### Microcontrollers

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131, USA  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 436-4314

La Chantrerie  
BP 70602  
44306 Nantes Cedex 3  
France  
TEL (33) 2-40-18-18-18  
FAX (33) 2-40-18-19-60

### ASIC/ASSP/Smart Cards

Zone Industrielle  
13106 Rousset Cedex  
France  
TEL (33) 4-42-53-60-00  
FAX (33) 4-42-53-60-01

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.  
Colorado Springs, CO 80906, USA  
TEL 1(719) 576-3300  
FAX 1(719) 540-1759

Scottish Enterprise Technology Park  
Maxwell Building  
East Kilbride G75 0QR  
Scotland  
TEL (44) 1355-803-000  
FAX (44) 1355-242-743

### RF/Automotive

Theresienstrasse 2  
Postfach 3535  
74025 Heilbronn  
Germany  
TEL (49) 71-31-67-0  
FAX (49) 71-31-67-2340

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.  
Colorado Springs, CO 80906, USA  
TEL 1(719) 576-3300  
FAX 1(719) 540-1759

### Biometrics

Avenue de Rochepleine  
BP 123  
38521 Saint-Egreve Cedex  
France  
TEL (33) 4-76-58-47-50  
FAX (33) 4-76-58-47-60

## 文献請求

[www.atmel.com/literature](http://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のウェブサイトには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 2006. 不許複製 Atmel®、ロコとそれらの組み合わせ、AVR®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AVR447応用記述(doc8010.pdf Rev.8010A-06/06)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。