AVR194: ATmega32M1使用ブラシレスDC電動機制御

要点

- BLDC電動機の基礎
- ハート・ウェア実装
- コード例

参考文献

- [1] ATmega32/64/M1/C1データシート
- [2] AVR138:ATmega32M1系列電力段制御器(PSC)料理本
- [3] AVR430:MC300ハートウェア使用者の手引き
- [4] AVR470:MC310ハートウェア使用者の手引き

1. 序説

この応用記述はATmega32M1 AVRマイクロ コントローラを用いて感知器形態でブラシレスDC(BLDC) 電動機制御を実装する方法を記述します。

ATmega32M1の電力段制御器単位部を備えた高性能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。

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、感知器形態でブラシレスDC電動機を制御する方法を詳述し、そしてこの応用記述で使われるATAVRMC310とATAVRMC300の基板の短い記述も与えます。

ソフトウェア実装もPID濾波器を用いたソフトウェア制御閉路で検討されます。

この応用記述は整流(転流)手順を制御するのにホール効果位置感知器を使うBLDC電動機制御応用だけを扱います。

2. 動作の理屈

ブラシレスDC電動機はそれらが多くの利点を持つため、益々多くの電動機応用で使われています。

それらは保守を少ししか必要としない、または全く必要としないようにブラシを全く持ちません。 それらはユニハーサルDCブラン電動機よりも少ない音響的且つ電気的な雑音しか発しません。 それらは(可燃性の製品と共に)危険な動作環境で使うことができます。

それらはまた良好な重さ/大きさの対電力比を持ちます。

このような電動機は小さな回転子慣性を持ちます。巻き線は固定子に取り付けられています。整流(転流)は電気回路によって制御されます。整流(転流)時間は位置感知器または巻き線逆起電力測定のどちらかによって提供されます。

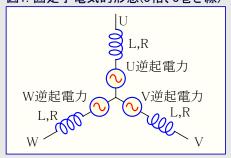
感知器形態では、通常、ブラシレスDC電動機は主な3つの部分、固定子、回転子、ホール感知器から成ります。

2.1. 固定子

基本の3相BLDC電動機の固定子は3つの巻き線を持ちます。多くの電動機ではより小さなトルクの波紋を持つように巻き線数が複製されます。

図1.は固定子の電気的回路図を示します。これは 直列にインダクタンス、抵抗、1つの逆起電力の3つの 要素を各々が含む3つの巻き線から成ります。

図1. 固定子電気的形態(3相、3巻き線)





8ビット **AV**P® 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。

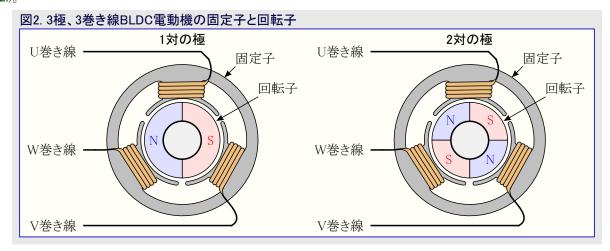
Rev. 8138A-04/08, 8138AJ2-03/21





2.2. 回転子

BLDC電動機の回転子は偶数の永久磁石から成ります。回転子の磁極数も電動機の段階量とトルク波紋に影響を及ぼします。より多くの極は段階をより小さくしてトルク波紋を少なくします。永久磁石は1~5対の極になります。或る場合ではそれが最大8対の極になり得ます(図2.)。

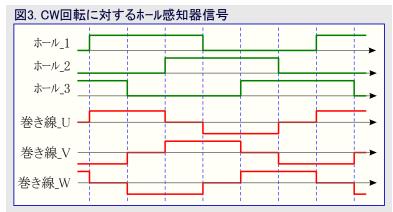


巻き線は静止している一方で、磁石が回転します。BLDC電動機の回転子は巻き線が回転子に配置される伝統的なユニハーサルDC電動機の回転子よりも軽くなります。

2.3. ホール感知器

回転子位置の予測に関して、電動機は3つのホール感知器が装備されています。これらのホール感知器は120°毎に配置されます。これらの感知器とで、6つの異なる整流(転流)が可能です。相整流(転流)はホール感知器の値に依存します。

ホール感知器値変化時に巻き線への電力供給が変わります。 正しい同期整流(転流)でトルクは殆ど一定且つ高くに留まります



2.4. 相整流(転流)

3相BLDC電動機の操作法の説明を簡単化するため、3つの巻き線だけを持つ代表的なBLDC電動機が考えられます。直前で示されたように、相整流(転流)はホール感知器値に依存します。電動機巻き線が正しく供給されている時に磁界が生成されて回転子が動きます。BLDC電動機に使われる殆どの基本整流(転流)駆動法はON/OFFの仕組み、巻き線が誘導または非誘導のどちらかです。同時に2つの巻き線だけが供給され、3つ目の巻き線は浮きです。電力への巻き線接続と中立バスが電流の流れを誘導します。これは台形整流(転流)または塊整流(転流)として参照されます。

ブラシレスDC電動機に命じるために3つの半ブリッシで作られた電力段が使われます。右の図4.は3つの半ブリッシ回路図を示します。

ホール感知器値読み込みはどのスパチが閉じるべきかを示します。

多極電動機に関しては電気的回転が機械的回転に対応しません。4極BLDC電動機は1つの機械的回転を持つのに4つの電気的回転周回を費やします。

磁界の強さは電動機の力と速度を決めます。巻き線の通る電流の流れを変えることにより、電動機の速度とトルクを調整することができます。電流の流れを制御する最も一般的な方法は巻き線を通る平均電流の流れを制御することです。平均電圧とこれによる速度を含む平均電流を調整するのにPWM(パルス幅変調)が用いられます。例えば、PWM周波数は応用(整流(転流)損失、可聴周波数など)に従って10k~200kHzの範囲が選ばれます。

3相、3巻き線BLDC電動機に関して、図5.で回転磁界が記述されます。

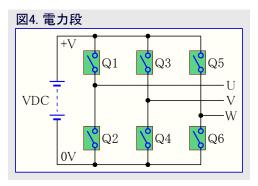
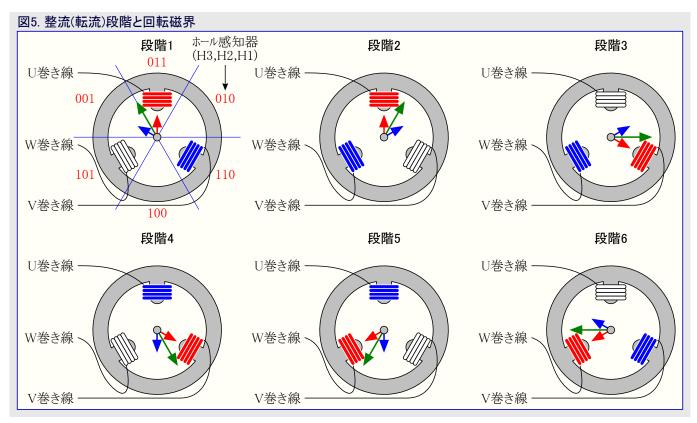


表1. CW回転用スイッチ整流(転流)			
相	スィッチ		
U-V	Q1:Q4		
U-W	Q1:Q6		
V-W	Q3:Q6		
V-U	Q3:Q2		
W-U	Q5:Q2		
W-V	Q5:Q4		
	相 U-V U-W V-W V-U W-U		



整流(転流)は回転界磁を作成します。段階1のU相はQ1(図4.参照)によって+DCハス電圧に接続され、V相はQ4によってGNDに接続され、そしてW相は無給電です。2つの磁束へクタはU相(赤矢印)とV相(青矢印)によって生成されます。この2つのヘクタの和は固定子磁束へクタ(緑矢印)を与えます。そして回転子は固定子磁束に従おうとします。回転子が与えられた位置に達すると直ぐにホール感知器の状態はその値を"010"から"011"に変え、新しい電圧様式が選択されてBLDC電動機に印加されます。そしてV相が無給電にされてW相がGNDに接続され、そして新しい固定子磁束ヘクタ、段階2'に帰着します。

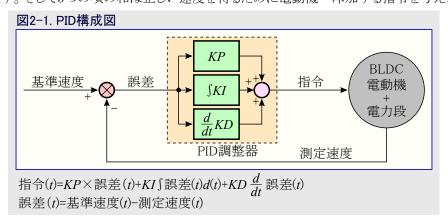
整流(転流)図の図3.と表1.に従うことにより、6つの整流(転流)段階に対応する6つの異なる固定子磁束へカタを得ます。この6段階が回転子の1回転を提供します。

2.5. PID調整

このブラシレスDC電動機制御の簡潔な理論上の紹介後に、実際の実装は例の手助けと共に紹介されます。この応用記述の次の部分はAtmelのATmega32M1マイクロコントローラで動くATAVRMC300 & ATAVRMC310スタータキットに基づくハート・ウェアとソフトウェアの実装で扱います。

ソフトウェアはPID調整器を通す速度の制御を含みます。このような調整器は3つの主な係数、KP,KI,KDで構成されます。

KPは比例利得係数、KIは積分利得係数、そしてKDは微分利得係数です。望む速度と現実の速度間の(図2-1.で誤差と呼ばれる)誤差は各利得で乗算されます。そして3つの項の和は正しい速度を得るために電動機へ印加する指令を与えます(図2-1.)。



KP係数は電動機の応答時間を決め、KI係数は静的誤差の相殺に使われ、そしてKDは位置調整のための部分で使われます(係数の調節についてはソフトウェアでの調整繰り返しを参照してください)。





3. ATmega32M1マイクロ コントローラ

ATmega32M1はCANとLINの接続性を持つ高度な電動機制御応用に対する統合された解決策を提供するために開発されました。 高性能AVR 8ビットRISC構造に基づき、ATmega32M1は複雑な算法の必要性を満足するために必要な、基本的な周辺機能の全てを統合します。それは差動増幅器と設定可能な利得任意選択を持つ10ビットA/D変換器のようなアナログ部を統合します。選択可能な比較レヘルを持つアナログ比較器とピン変化I/Oでの割り込み。マイクロコントローラはそれらのシステム環境に於いてBLDC電動機を制御するために必要な全ての資源を提供します。

ATmega32M1は外部の能動部品を全くなしで感知器なし電動機制御を許すための独立した非反転と反転の入力を含みます。逆起電力(BEMF:Back Electro Magnetic Field)測定に3つの個別比較器が利用可能です。それの基準(比較レヘ・ル)はD/A変換器出力経由の固定またはどんな外部基準電圧にもできます。最大64MHzでクロック駆動する12ビット万能同期電力段制御器は電動機の3つの半ブリッシ を制御するための6つの設定可能な補完高速高精度信号を発生します。最大周波数は約1/1000の電圧分解能の結果で64kHzです。ハートウェア誤り検出は誤りが検出された場合に自動的且つ直ちに電動機を安全な位置に置きます。

3.1. ATmega32M1主な特徴

■ データ メモリと不揮発性プログラム メモリ

- 実装自己書き換え可能な32Kバイト(16K語)フラッシュ メモリ内蔵
- ・1KバイトのEEPROM
- 2Kバイの内蔵SRAM

■ 内蔵周辺機能

- ・1つの12ビット高速電力段制御器(PSC)
 - ・柔軟な沈黙時間付き非重複反転PWM出力ピン
 - ・可変PWMデューティ比と可変PWM周波数
 - ・全PWMレジスタの同期更新
 - 緊急事態用の自動停止機能
- ・独立した前置分周器、比較機能付き、1つの汎用8ビットタイマ/カウンタ
- ・独立した前置分周器、比較、捕獲機能付き、1つの汎用16ビットタイマ/カウンタ
- ・6つのメッセージ項目を持つCAN 2.0A/B
- ・LIN2.1と1.3の制御器、または8ビットUART
- ・1つの主装置/従装置動作SPI直列インターフェース
- 10ビット A/D変換器
 - ・11までのシングルエンド入力チャネルと、3つの完全な差動チャネル対
 - ・設定可能な利得(差動チャネルでの×5,×10,×20,×40)
 - 内部基準電圧
 - 電源電圧直接測定
- ・可変電圧基準(アナログ)比較器、A/D変換器)用10ビット D/A変換器
- ・可変検出閾値を持つ4つのアナログ比較器
- ・100μA±2%電流源(LIN節(ノード)認証)
- ・ピン変化での割り込みと起動復帰
- ・独立したチップ上の発振器を持つ設定可能なウォッチドッグタイマ
- ・チップ上の温度感知器

■ 特殊マイクロ コントローラ機能

- ・アイドル、A/D変換雑音低減、パワーダウン、スタンバイの4つの低消費動作
- ・電源ONリセット回路と設定可能な低電圧検出(BOD)
- ・SPIポート経由での実装書き込み
- ・CAN動作(16MHz)用高精度クリスタル用発振器
- ・校正可能な内蔵RC発振器 (8MHz)
- ・ 高速PWM(32MHz, 64MHz)とCPU(16MHz)用のチップ上PLL

注: ATmega32M1マイクロ コントローラの完全な記述についてはATmega32M1データシートを参照してください。

4. ハート・ウェア説明

この応用はATAVRMC300とATAVRMC310基板で開発されて検査されています。

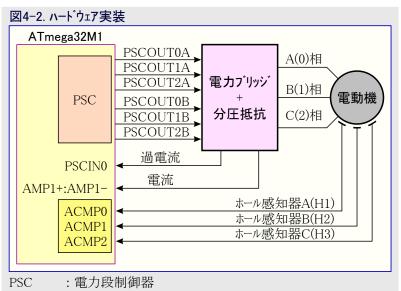
ATAVRMC300基板はブリッシを組み込んだ電力基板で、一方ATAVRMC310はATmega32M1プロセッサ周辺を組み込んだプロセッサ基板です。

これら2つの基板の徹底的な記述は「AVR430:MC300ハート・ウェア使用者の手引き」と「AVR470:MC310ハート・ウェア使用者の手引き」を参照してください。回路図もこれらの応用記述で利用可能です。

図4-1.はATAVRMC300基板と共に使われるATAVRMC310の構成図を与えます。



図4-2.で示されるようにマイクロ コントローラは電力段制御器(PSC)を含みます。PSCは6つの出力信号を持つパルス幅変調器として見ることができます。交差導通を避けるため沈黙時間制御が統合されています(PSCまたは以降の図4-3.についての更なる情報に関してはATmega32M1データシートをご覧ください)。



ACMPi : アナログ比較器非反転入力 (i=0,1,2)

CMPi+/-: アナログ 差動増幅器チャネル非反転/反転入力 (i=0,1,2)

誤り入力(過電流)はPSCINに接続されます。この誤り入力は全てのPSC出力の禁止をマイクロコントローラに許します。 設定可能な5,10,20,40倍の利得段を持つ2つの差動増幅チャネルで電流を測定することが可能です。

"過電流"信号は内部比較器からやって来ます。比較器の基準電圧は内部D/A変換器によって調節することができます。





相整流(転流)はホール感知器値に従って行わなければなりません。ホール感知器A(H1)、ホール感知器B(H2)、ホール感知器C(H3)は外部割り込み元または3つの内部比較器に接続されます。比較器は外部割込みと同じ形式の割り込みを生成します。表4-1.はスタータ キットに於いてマイクロ コントローラの入出力ポートがどう使われるのかを示します。

表4-1. マイクロ コントローラ使用入出力ポート(TQFP32外囲器)

ピン名	ピン番号	信号名	説明
	#°−	ŀB	
PB0/MISO/PSCOUT2A	8	WH	Q5
PB1/MOSI/PSCOUT2B	9	WL	Q6
PB2/ADC5/INT1/ACMPN0	16		
PB3/AMP0-	23		
PB4/AMP0+	24	Vm'	
PB5/ADC6/INT2/ACMPN1/AMP2-	26		
PB6/ADC7/PSCOUT1B	27	VL	Q4
PB7/ADC4/PSCOUT0B	28	UL	Q2
	ホ [°] ー	łC	
PC0/INT3/PSCOUT1A	30	VH	Q3
PC1/PSCIN1/OC1B	3		
PC2/T0/TXCAN	6	TXCAN	通信形態に依存
PC3/T1/RXCAN	7	RXCAN	
PC4/ADC8/AMP1-/ACMPN3	17	GNDm	分圧電流-
PC5/ADC9/ACMP3/AMP1+	18	ShCo	分圧電流+
PC6/ADC10/ACMP1	22	H2	ホール感知器2
PC7/D2A/AMP2+	25	DAC_OUT	D/A変換器出力
PD0/PSCOUT0A/XCK/SS_A	29	UH	Q1
PD1/PSCIN0/CLKO	32	Fault	MC300で未使用
PD2/PSCIN2/OC1A/MISO_A	1	MISO	
PD3/TXD/TXLIN/OCOA/SS/MOSI_A	2	MOSI/LINTxD/TxD	通信形態に依存
PD4/ADC1/RXD/RXLIN/ICP1A/SCK_A	12	SCK/LINRxD/RxD/POT	
PD5/ADC2/ACMP2	13	НЗ	ホール感知器3
PD6/ADC3/ACMPM/INT0	14		
PD7/ACMP0	15	H1	ホール感知器1
	π°−		
PE0/RESET/OCD	2	RST	
PE1/OC0B/XTAL1	10	Quartz CAN	
PE2/ADC0/XTAL2	11	Quartz CAN	

Vm'は実装されますが、使われません。これはDCバス電圧の値を得るのに使うことができます。

UH,UL,VH,VL,WH,WL出力は電力ブリッジを制御するのに使われます。前で見られるように、それらはPWM信号を生成する電力段制御器(PSC)に依存します。このような応用に関して、推奨動作形態は中央整列動作(図4-3.をご覧ください)で、電流測定のためのA/D変換同期化調整にPSCn比較RAレジスタ(POCFnRA)が使われます。

レジスタ値に従った全てのタイミング値を得るにはATmega32M 1のデータシートを参照してください。PSCの入力クロックは内部 PLLからやって来ます。

電力段に印加されるPWM信号に2つの戦略を用いることができます。最初のもの(高速減衰)は電力ブリッジのH側とL側にPWM信号を印加し、2つ目のもの(低速減衰)は電力ブリッジのH側だけにPWM信号を印加します。

図4-3. 中央整列形態でのPSCOUTnAとPSCOUTnB基本波形
POCR_RB POCR_NSB POCR_NSA PSCカウンタ
PSCOUTnA
PSCOUTnB

沈黙時間
沈黙時間

5. ソフトウェア説明

AVR194ソフトウェア一式と共に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。

AtmelはブラシレスDC電動機を制御するためのライブラリを提供します。最初の段階はマイクロ コントローラを構成設定して初期化することです。

使われるべき関数はmc_init()です。これはハードウェアとソフトウェアの初期化関数を呼び出して全ての電動機パラメータ(電動機方向、電動機速度、電動機走行、電動機停止)を構成設定します。

5.1. インターフェース関数

マイクロ コントローラの構成設定と初期化の後で電動機を始動することができます。電動機を制御するには少しの関数だけが必要とされます。全ての使用者関数は以下のようにmc_interface.hファイルで定義されます。

void mci run(void)

電動機の始動に用いられます。デューティサイクルを設定するために調整繰り返し関数が開始されます。そして最初の相整流(転流)が実行されます。

Bool mci_motor_is_running(void)

電動機指令状態を得ます。'TRUE'ならば電動機は走行中です。'FALSE'ならば電動機は停止されています。

void mci_stop(void)

電動機を停止するのに用いられます。

void mci set ref speed(U8 speed)

基準速度を設定します。

U8 mci_get_ref_speed(void)

基準速度を返します。

void mci_forward()

電動機の方向を'CW'(時計回り)に設定します。

void mci_backward()

電動機の方向を'CCW'(反時計回り)に設定します。

U8 mci_get_motor_direction(void)

電動機の回転方向を返します。

U8 mci_set_measured_speed(U8 measured_speed)

mesured speed変数内の測定速度を保存します。

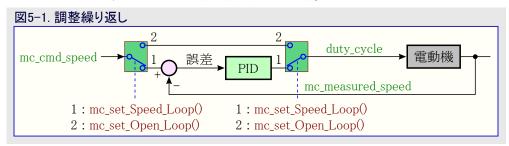
U8 mci_get_measured_speed(void)

測定速度を得ます。

5.2. 調整繰り返し

2つの関数が調整繰り返し、開路繰り返しと速度繰り返しを選びます。図5-1.はソフトウェアで実装されている調整繰り返しを示します。この2つの関数はmc_set_speed_loop()とmc_set_open_loop()です。

開路繰り返し形態ではPWM用のデューティサイクルとして基準速度が使われます。



速度繰り返しはPID調整器を持つ速度調整繰り返しにあります。

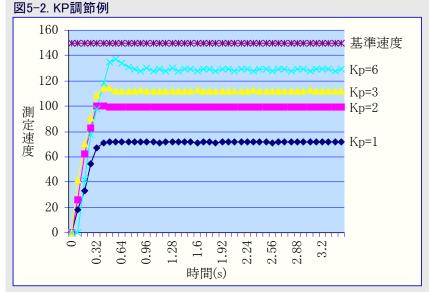
KPとKIの係数を調節する方法を更に説明します。係数KDは調整繰り返し内に存在しますが使われません。





前で示されるように、電動機の応答時間を調整するのに係数KPが用いられます。初回はKIとKDを'0'に設定します。正しい電動機応答時間を得るためにKPの差の値を試みてください。

- ・ 応答時間が遅すぎる場合は、KP利得を増してください。
- ・ 応答時間が素早いけれども、電動機速度が不安定 な場合は、KP利得を減らしてください。



KIパラメータは、静的誤差を相殺するのに使われます。 KP係数を無変化のままにしてKIパラメータを設定してく ださい。

- ・ 誤差が未だ0と違う場合は、KI利得を増してください。
- 誤差が相殺されているけれども、発振が現れている場合は、KI利得減らしてください。

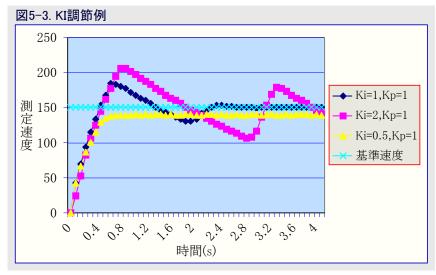


図5-2.と**図5-3**.での正しいハ[°]ラメータはKP=1、KI=0.5、KD=0です。

KDパラメータの調整は以下のとおりです。

- ・応答時間が未だ遅すぎる場合は、KD利得を増してください。
- ・応答時間が未だ不安定な場合は、KD利得を減らしてください。

別の重要な点は採取時間です。これは系の応答時間に従って選択されなければなりません。採取時間は(シャノンとナイキストの定理に従って)系の応答時間の最低2倍小さくなければなりません。

(前に説明された)採取時間構成設定に2つの関数が利用可能です。それらは250μs毎に設定されるg_tickと呼ばれる全体変数に帰着します。この変数とで採取時間を構成設定することが可能です。

5.3. CPUとメモリの用法

全ての測定はFosc=16MHzで実現されています。それらは電動機形式(極の対数)にも依存します。4対の極の電動機では、ホール感知器周波数が電動機回転よりも4倍速くなります。

表5-1.での全ての結果は4対の極で6900rpmの最大速度を持つ3相のBLDC電動機で得られます(ATAVRMC300キットで提供される電動機)。

表5-1. マイクロ コントローラ利用率					
関数	パラメータ	活動時間	活動間隔	使用率(%)	
mc_estimation_speed()	速度=6900rpm	15µs	2 ms	0.75	
mc_switch_commutation()	速度=6900rpm	8µs	300µs	2.7	
mc_regulation_loop()	開路繰り返し	1.4μs	80 ms	0.0175	
	閉路繰り返し	20µs	80ms	0.025	

最悪の場合、マイクロコントローラの使用率は6900rpmで80msの採取時間で約3.5%です。

全ての割合測定は同じソフトウェアで行われています。通信形態は全く使われていません(UARTなし、LINなし、~)。 これらの条件でマイクロ コントローラのメモリ使用は以下のとおりです。

- 5500バイトのコードメモリ(フラッシュ メモリ占有率=17%)。(UARTを通した通信規約を含む)
- ・ 488バイトのデータ メモリ(SRAM占有率=24%)。(スタックとUARTを通した通信規約を含む)

6. ATAVRMC300 & ATAVRMC310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6-1. ATAVRMC300ジャンパ設定

	ジャンハ゜	位置	注釈
I	J1 (VHa)	1番ピンと2番ピンを短絡	VHa=+5V
	J2 (VCC)	開放	VCC=+5V

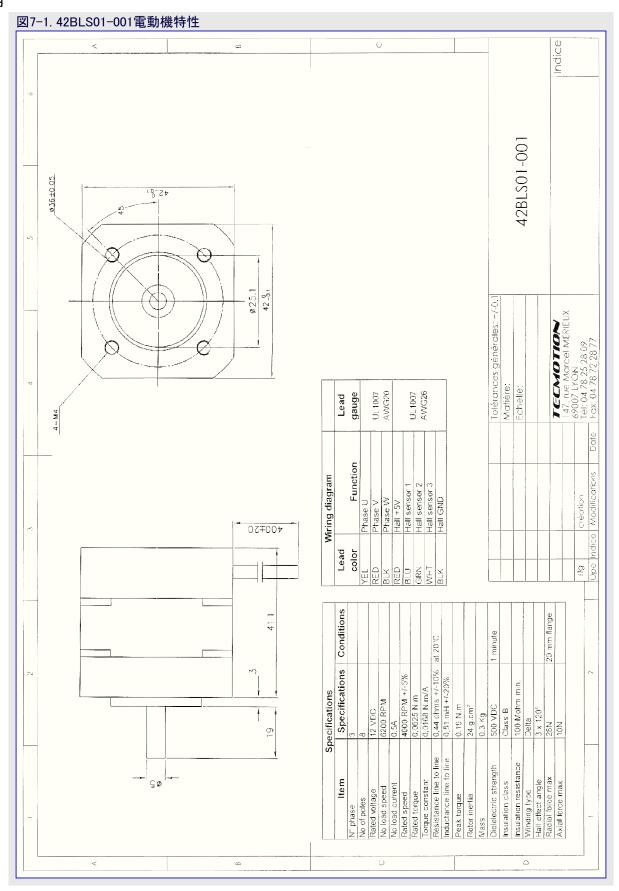
表6-2. ATAVRMC310ジャンパ設定

シ゛ャンハ゜	位置	注釈
J5	Vm'	PB4=Vm'
Ј6	(未定義)	PB3=x
Ј7	RxCAN	PC3=RxCAN
Ј8	ShCo	PC5=ShCo(分圧+)
Ј9	GNDm	PC4=GNDm(分圧-)
J21	開放	PB2=(未使用)
J22	Hall	PD7=H1
J23	開放	PB5=(未使用)
J24	Hall	PC6=H2
J25	開放	PD6=(未使用)
J26	Hall	PD5=H3





7. 追補





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

TEL (852) 2245-6100 FAX (852) 2722-1369

Atmel Europe

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

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 ジャハン株式会社 TEL (81) 03-3523-3551 FAX (81) 03-3523-7581

製品窓口

ウェブサイト

www.atmel.com

文献請求

www.atmel.com/literature

技術支援

avr@atmel.com

販売窓口

www.atmel.com/contacts

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のウェブサ小に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。たとえるtmel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 2008. 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AVR194応用記述(doc8138.pdf Rev.8138A-04/08)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訳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。