

# AVR275 : AT90USB系列を用いる 3相ブラシレスDC電動機の感知器に基づく制御

## 要点

- ホール感知器出力変化での3 $\mu$ s未満の応答時間
- 原理的に3478krPM(電氣的RPM)の最大回転数
- 閉路調整と、過電流、停止、過負荷の検出を支援
- 通信に関してUSB、UART、TWI、SPIが利用可能

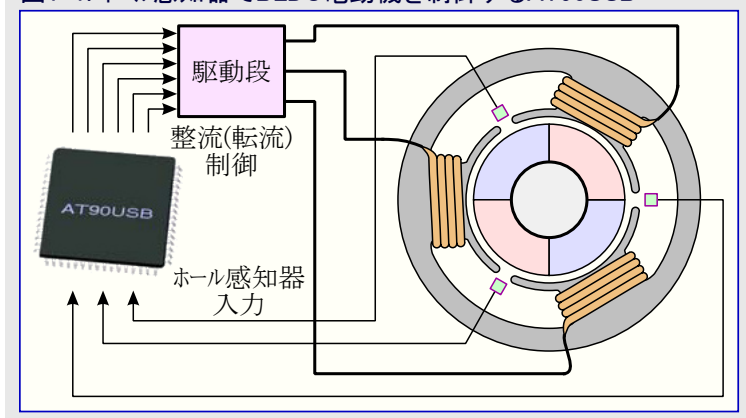
## 1. 序説

ブラシレスDC(BLDC)電動機の使用は継続的に増加しています。その理由は明白で、BLDC電動機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)電動機よりも少ない音響的、電氣的な雑音を生じるからです。

ユニバーサルDC電動機ではブラシが正しい瞬間で物理的に巻線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、または巻線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われます。位置感知器は電動機が位置決めに使われる応用でも度々使われます。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、度々使われます。

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電動機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。

図1-1. ホール感知器でBLDC電動機を制御するAT90USB



## 2. 動作の理屈

位置感知器とでのBLDC電動機の制御は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のAT90USBはBLDC電動機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、USB、SPI、UART、TWI規約を使って通信を行うことができます。

3相BLDCはいくつかの巻線を持つ固定子から成ります。基本的な3相BLDC電動機は3つの巻線を持ちます(図2-1をご覧ください)。一般的にこの3つの巻線はU,V,Wとして参照されます。多くの電動機では、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巻線数が多重化されます。

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2-1は1組以上の基本巻線と多数の極を持つ各種電動機の形態を示します。



8ビット AVR<sup>®</sup>  
マイクロコントローラ

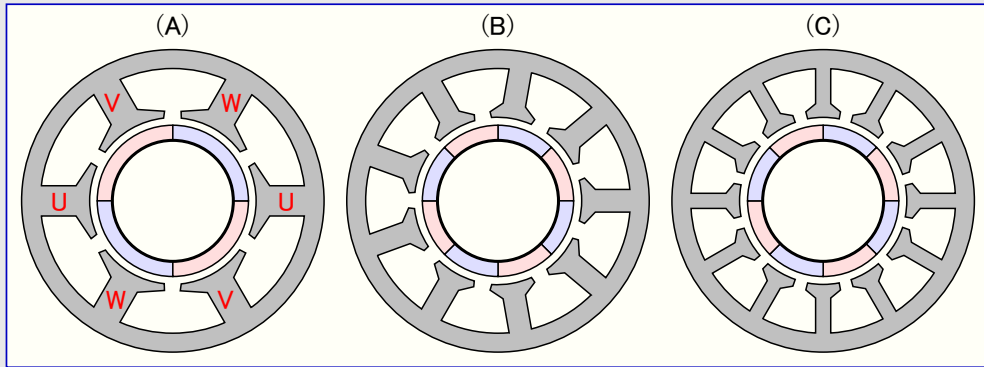
## 応用記述

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. 7672A-09/06, 7672AJ2-03/21

図2-1. BLDC電動機の各種形式

電動機(A)は2組の基本巻線と4つの(磁)極を持ち、(B)は3組の巻線と8極を持ち、(C)は4組の巻線と8極を持ちます。



巻線が停まる一方で磁石が回転する事実は巻線が回転子に配置される伝統的なユニバーサルDC電動機よりも軽いBLDC電動機の回転子にします。

## 2.1. 基本BLDC電動機の実作

3相BLDC電動機をどう動かすかの説明を簡単にするため、3つの巻線と2つの磁極だけを持つ基本BLDCが考察されます。

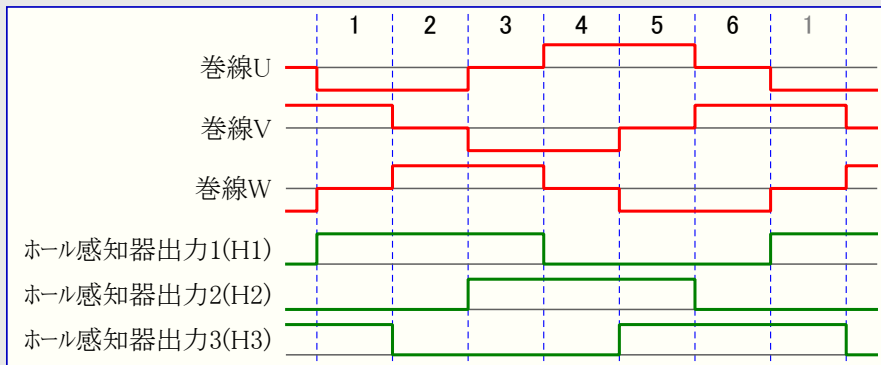
電動機を回転させるために巻線は予め定められた流れ(順序)で励磁(または活性化)され、時計回りと呼ぶ1方向で電動機を回します。逆順での流れを行うと、電動機は逆方向で動きます。この流れ(手順)が巻線に於ける電流の流れの方向を定義し、それによって磁界が個別巻線によって生成されることを理解すべきです。電流の方向は巻線によって生成される磁界の向きを決めます。磁界は回転子の永久磁石を引き付け、そして退けます。巻線での電流の流れ、それによって正にその瞬間で磁界の極性を(正しい手順で)変更することによって電動機は回転します。回転子を回すための巻線を通る電流の流れ切り替えは整流(転流)として参照されます。

3相BLDC電動機には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気の1回転を表します。多極電動機については電気的な回転が機械的な回転に対応しません。4極BLDC電動機は機械的な1回転のために電気的な2回転周回を費やします。

BLDC電動機に使わ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。巻線は(或るまたは別の方向で)導電するか、または導電しないかのどちらかです。巻線を電力に接続し、そして本来の主線が電流の流れを誘引します(駆動段を使って達成されます)。これは正弦波整流(転流)または方形(ブロック)整流(転流)として参照されます。代わりの方法は正弦状波形を使うことです。この応用記述は方形(ブロック)整流(転流)法を網羅します。

磁界の強さが電動機のトルクと速度を決めます。巻線を通る電流の流れを変えることにより、電動機の色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巻線を通る(平均)電流の流れを制御することです。これは巻線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時間の間の関連が巻線上の平均電圧、そしてそれによる平均電流を定義します。

図2-2. BLDC電動機用の6つの整流(転流)状態での、巻線を通る電流の流れ/U,V,Wの巻線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。

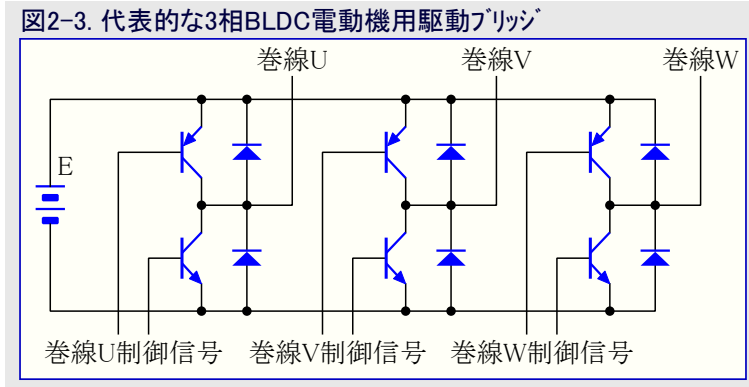


BLDC電動機に関しては整流(転流)制御が電気構成物によって扱われます。整流(転流)を制御するための最も簡単な方法は電動機内側の位置感知器の組からの出力に従って整流(転流)することです。通常、ホール感知器が使われます。ホール感知器は整流(転流)が変更されるべき時にそれらの出力を変えます(図2-2をご覧ください)。

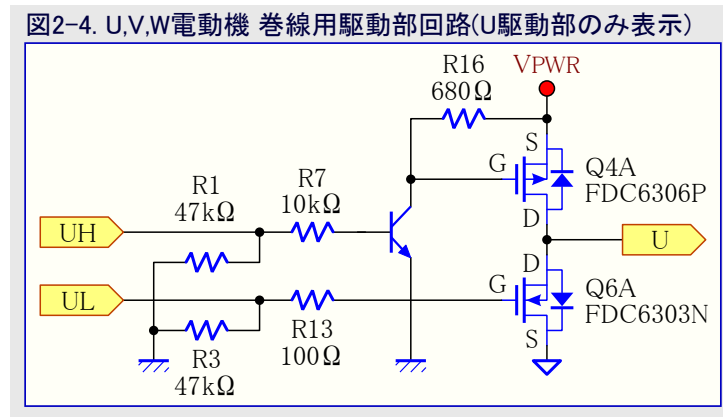
BLDC電動機制御応用に於ける電気構成物に関する2つ目の機能は開路または閉路のどちらかの制御によって望むような速度であることを保証することです。けれどもどちらの場合に於いても、停止検出(回転を妨げられた電動機)と過負荷検出を持つことが推奨されます。

## 2.2. 実装 - ホール感知器に基づくBLDC電動機の制御

この実装は開路でのBLDC電動機制御です。停止と過負荷の状況に応答できるように電動機速度が測定され、そして電動機電流を監視することができます(未実装)。3つのPWMチャンネルが電動機を制御するための半ブリッジのLow側に接続されます。BLDC電動機用の代表的な駆動段は図2-3で見ることができます。



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。図2-4は各巻線に対する実際の駆動部実装を示します。望むなら、他の実装を用いることができます。駆動部の既定状態はOFFです。



OC1A,OC1B,OC1Cの3つのPWMチャンネルが駆動ブリッジのLow側(例えば、図2-4.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電動機を制御し、電動機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。

更にブリッジのHigh側もPWMに基づく制御が可能で、AT90USBのタイマ/カウンタ1に加えてタイマ/カウンタ3も必要です。この応用記述と共に配給される実装ではHigh側駆動部が汎用入出力によって制御されます。

能動ブレーキが使われる場合、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チャン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1つのADCチャンネルを使うことができます(未実装)。A/D変換器(ADC)は10ビットの分解能を持ち、内部2.56V基準電圧を使うことができ、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。電動機速度を設定するための可変抵抗器電圧を測定するのに2つ目のADCチャンネルを使うことができます(電動機を制御するのにデジタル通信インターフェースが使われない場合に有用です)。

ホール感知器出力は全てがレベル変化での割り込み(外部割り込み)を特徴とするポートE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)状態が決められます。

使用される資源の概要が表1.で一覧にされます。

USB,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。通信応答時間での潜在的な影響が第一に考慮されないなら、通信に対して割り込みを使うことが推奨されないことに注意してください。

表1. 電動機制御に使用される資源

資源	使い方
PB5,6,7 (タイマ/カウンタ1:OC1A/B/C)	Low側駆動部制御(UL,VL,WL)
PB2,3,4	High側駆動部制御(UH,VH,WH)
PE5,5,6	ホール感知器入力(A,B,C)

## 2.3. USBインターフェース

電動機の手速と方向を制御するのにHID(人装置インターフェース)クラスが使われ、それは電動機の開始と停止が可能です。USBを通して電動機の手速を取得するための特殊フレームもあります。表2.はファームウェアとインターフェースするためのUSBフレーム内容を詳述します。

表2. USB通信に使うフレーム

形式	第1データ	第2データ	第3データ	第4データ	第5データ	活動
OUT	\$01	(無効)	(無効)	(無効)	(無効)	電動機走行
OUT	\$02	(無効)	(無効)	(無効)	(無効)	電動機停止
OUT	\$03	\$HH	\$LL	(無効)	(無効)	電動機手速設定(手速=\$HHLL)
OUT	\$04	\$xx	(無効)	(無効)	(無効)	電動機方向設定(xx=0:CCW,xx=1:CW)
IN	\$05	\$HH	\$LL	方向(\$dd)	走行/停止(\$ss)	状態取得 測定された手速=\$HHLL 方向(dd=0:CCW,dd=1:CW) 走行/停止(\$ss=\$00:停止,\$ss=\$FF:走行)

## 2.4. ファームウェア説明

全てのコードは(4Kバイトまでのバイト出力で無料の)IAR EWAVR 4.20Aコンパイラを使ってC言語で実装されています。このファームウェアはAVR328(USB標準HID実装)で記述されるHID実装に基づきます。

主な関数が下で一覧にされます。電動機制御に使われる最も重要な関数だけが一覧にされます。ホール感知器出力での変化で整流(転流)変更を処理する外部割り込みルーチンは流れ図によって記述されます。

`void Init_MC_timer1_pwm( void )`

タイマ/カウンタ1を高速PWM動作形態での走行に初期化します。

OC1xは比較一致で解除(0)されます。

`void Init_MC_Pin_Change_Interrupt( void )`

ホール感知器信号を感知するのに使わ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 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。先に電動機の手速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 int speed )`

PWM出力のデューティ サイクル、それによって電動機の手速を制御するタイマ/カウンタ1の比較レジスタを更新します。使われる方法は全てのPWMチャンネルが同時に更新される(、そして同じデューティ サイクルを保つ)ことを保証します。

`void Init_Speed_Timer0( void )`

タイマ/カウンタ0をCkI/O/1024での溢れに初期化します。タイマ/カウンタ0(8ビット)は8MHzのクリスタルで32ms毎に溢れます。この時間基準は電動機手速の測定に使われます。

`_interrupt void TIMER0_OVF_ISR( void )`

タイマ/カウンタ0割り込みは8MHzクリスタルで32ms毎に起き、それによってMeasured\_speed変数が更新されます。

`void Run_motor( void )`

電動機を走行するためにOC1x出力を許可します。

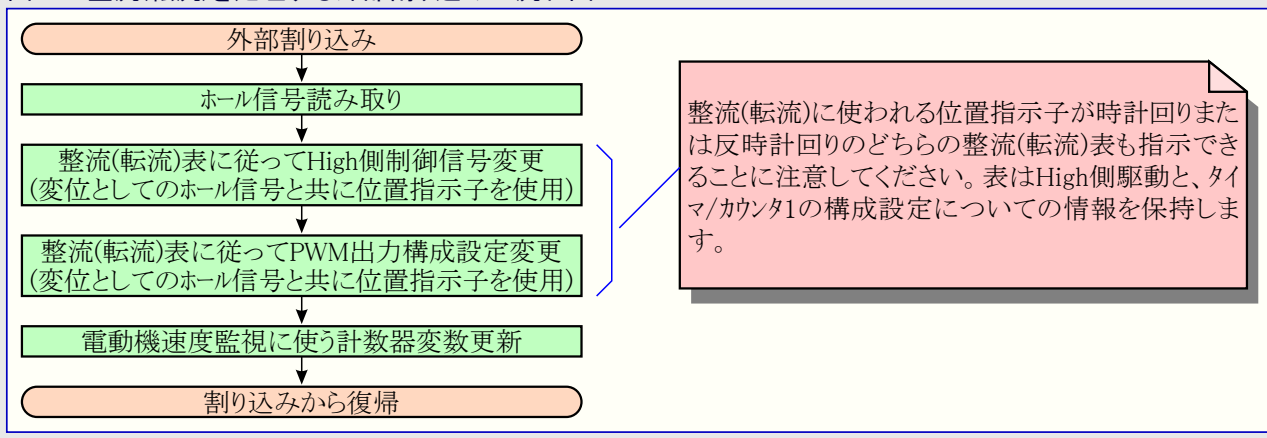
`void Stop_motor( void )`

電動機を停止するためにOC1x出力を禁止し、駆動段へ接続されるAVRからの出力を浮かせます。

`void Hall_ISR( void )`

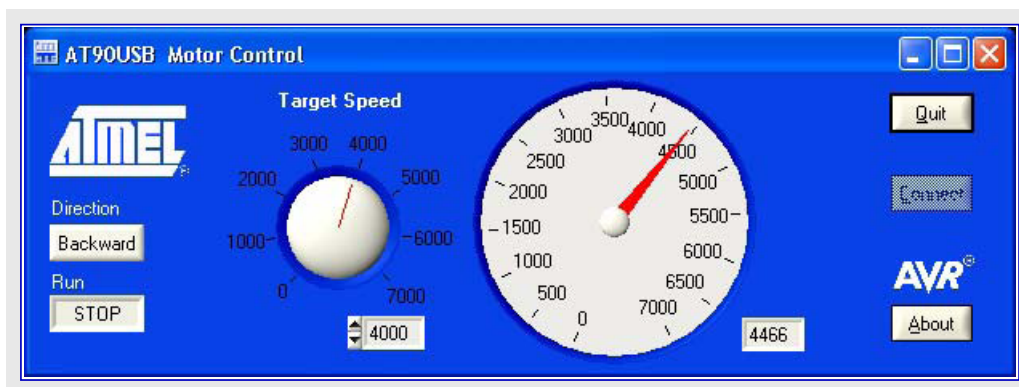
駆動部のLow側を制御するPWM出力と駆動部のHigh側を制御するI/Oを更新します。最高の割り込み手速を保証するため、割り込みに使われる変数は(この目的だけに固定化され、)予約されたレジスタに置かれます。更に、整流(転流)を行うのに必要とされる情報は、変位(オフセット)としてホール感知器入力信号を用いて非常に効率的にアクセスすることができる表で配置されます。この割り込みは図2-5.内の流れ図によって記述されます。

図2-5. 整流(転流)を処理する外部割り込みの流れ図



## 2.5. PC ソフトウェア実行

電動機の色度と方向の制御を許す(Windows2000とXP下で走行する)PCソフトウェアが利用可能で、これは測定された速度を見ることも許します(下図をご覧ください)。



## 2.6. 現実装の性能

- 速度制御に於ける10ビット分解能
- 概ね3500バイトのコード量
- ホール感知器信号変化に対する5 $\mu$ s以下の応答時間

外部割り込み(ホール感知器入力)ルーチンは概ね23CPU周期かかります。8MHzに於いてこれは電氣的な回転によって17.25 $\mu$ s(23周期 $\times$ 6整流(転流)状態)を与えます。これは1分間当たり3478k電氣的回転を生じます。4対の極の電動機を使う場合、(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869k機械的RPMを与えます。



## 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AVR275応用記述(doc7672.pdf Rev.7672A-09/06)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。