

## AVR675 : 構成設定可能な3相BLDC送風機

Atmel 8ビット マイクロ コントローラ

## 要点

- 3相BLDC送風機応用
- 感知器なし逆起電力(BEMF)制御算法
- Atmel ATtiny461AまたはAtmel ATtiny861A用
- 参照基準設計ハードウェアとファームウェア
- PCに基づくAtmel電動機制御構成設定ユーティリティ
- 調整の指針

## 序説

この応用記述は感知器なし制御を実装し、ATtiny461Aマイクロ コントローラを用いて構成設定可能な3相ブラシレスDC(BLDC)送風機の実装と使用を記述します。完全なハードウェア システムは12V3相BLDC送風機、構成設定可能なBLDC送風機基板、USB-UARTブリッジ ケーブル、AC電源アダプタ、ATtiny 461Aで走行するファームウェア、送風機を特定応用に独自化するためのPCに基づく電動機制御構成設定ユーティリティを含みます。

1. 動作の理屈	3
1.1. 概要	3
1.2. ハードウェア	3
1.3. ファームウェア	3
1.4. 電動機制御構成設定ユーティリティ	3
2. 系の詳細	3
2.1. ハードウェア	3
2.1.1. 3相BLDC送風機	3
2.1.2. 構成設定可能なBLDC送風機基板	4
2.1.3. USB-UARTブリッジケーブル	4
2.1.4. 万能電源アダプタ	5
2.2. ファームウェア	5
2.2.1. 制御構造	5
2.2.2. 割り込み処理ルーチン	5
2.2.3. 通信	6
2.3. 電動機制御構成設定ユーティリティ	6
2.3.1. ユティリティの配置	7
2.3.2. 変数	7
2.3.3. 変数作図	7
2.3.4. パラメータ	7
2.3.5. ファイル機能	7
3. 系の走行	8
3.1. ハードウェア	8
3.2. ファームウェア	8
3.3. 電動機制御構成設定ユーティリティ	10
3.3.1. 電動機制御構成設定ユーティリティの走行	10
3.3.2. 電動機変数と変数作図	10
3.3.3. 電動機パラメータ	12
3.3.4. 電圧許可	13
3.3.5. 発振器校正	13
3.3.6. 動作形態とinput_cmd	14
3.3.7. 逆起電力感知PLL調整	14
3.3.8. 微調整開始	15
3.3.9. 失速/停止からの回復	16
3.3.10. 速度制御調整	16
3.3.11. 速度命令割り当て	16
3.3.12. 独立送風機動作	17
4. 結び	17
追補A. 回路図	18
追補B. キット部品一覧	19
追補C. 改訂履歴	19

# 1. 動作の理屈

## 1.1. 概要

この応用記述は完全な3相BLDC送風機制御系の記述と使用法を網羅します。

この資料を読んだ後で、読者は系のハードウェア、ファームウェア、そして電動機制御構成設定ユーティリティの知識を持つべきです。また使用者は電動機制御構成設定ユーティリティを用いてBLDC送風機を構成設定して調整し得るべきです。

## 1.2. ハードウェア

ハードウェアは完全な送風機制御系から成ります。この系は3相BLDC送風機、構成設定可能なBLDC送風機基板、USB-UARTブリッジケーブル、最終応用に対して送風機を構成設定して調整するために、使用者が提供するPCと一緒に働く全てのハードウェアツールに提供するAC電源アダプタから成ります。

## 1.3. ファームウェア

Atmel ATtiny461A上で走行するファームウェアは感知器なしBLDC電動機制御用の制御構造を提供します。感知器なし制御技術は逆起電力(BEMF:Back ElectroMotive Force)感知位相固定化閉路(PLL)を形成するために逆起電力採取を使います。速度制御は比例積分(PI)制御部によって提供されます。逆起電力感知位相固定化閉路と速度制御閉路(繰り返し)の両方は、[第3章](#)で網羅される構成設定と調整が必要です。

## 1.4. 電動機制御構成設定ユーティリティ

Atmelの電動機制御構成設定ユーティリティはファームウェア変更の必要なしにATtinyのEEPROMに格納される設定パラメータを通して、送風機応用を構成設定して調整するためのツールとして提供されるPC上で走行するソフトウェアです。

構成設定は既知のまたは計算された値である設定パラメータから成ります。これらの量はATtinyのEEPROM内に設定されるパラメータに変換します。調整は最適値を見つけ出すためにパラメータの設定と試験の繰り返し処理を意味します。これらの値は、容易に計算されず、未知を意味し、また容易に測定可能でない量で、故に調整は最もアクセス可能な最適化の方法を提供します。

# 2. 系の詳細

## 2.1. ハードウェア

ハードウェアは[図2-1](#)で示されるように、3相BLDC送風機、構成設定可能なBLDC送風機基板、USB-UARTブリッジケーブル、それとAC電源アダプタから成ります。



### 2.1.1. 3相BLDC送風機

3相BLDC送風機は以下から成ります。

1. 3相、8極、永久磁石BLDC電動機
2. プラスチック外装
3. 送風機プロペラ
4. 構成設定可能なBLDC送風機基板への接続用に引き出された3つの電動機導線

[図2-2](#)で示される送風機はDC 12V入力用で23,000rpmで1,2Aと評価されます。

図2-2. 3相BLDC送風機



## 2.1.2. 構成設定可能なBLDC送風機基板

構成設定可能なBLDC送風機基板はACアダプタと3相BLDC送風機間の電力の流れだけでなく、外界からマイクロコントローラへの命令変換も制御します。

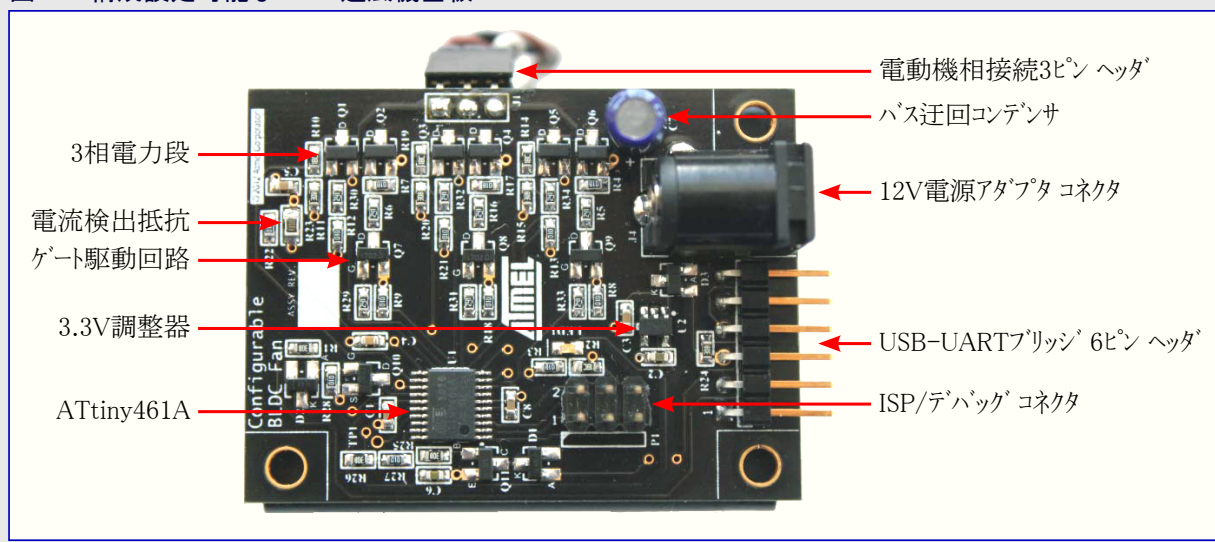
構成設定可能なBLDC送風機基板は以下の構成物から成ります。

1. Atmel ATtiny461A AVR<sup>®</sup>マイクロコントローラ
2. AVRに給電するための3.3V調整器
3. ゲート駆動回路
4. 電流検出抵抗
5. 下側スイッチとしての3つのNチャネルMOSFETと上側スイッチとしての3つのPチャネルMOSFETから成る3相電力段
6. 電動機相接続用3ピンヘッダ
7. DCバス迂回コンデンサ
8. 12V電源アダプタコネクタ
9. USB-UARTブリッジ用6ピンヘッダ
10. ISP/デバッグコネクタ

構成設定可能なBLDC送風機基板は12Vの公称入力電圧に対して相当たり1.2A出力と評価されます。大雑把な部品配置が図2-3.で示されます。

完全な回路図は追補A.で示されます。

図2-3. 構成設定可能なBLDC送風機基板



## 2.1.3. USB-UARTブリッジケーブル

USB-UARTブリッジケーブルはPCと構成設定可能なBLDC送風機基板間の通信を提供します。このケーブルはFTDIからの標準製品です。部品番号は追補B.で一覧にされます。

図2-4. USB-UARTブリッジケーブル



### 2.1.4. 万能電源アダプタ

万能電源アダプタは構成設定可能な送風機基板の給電のための12Vを提供します。このアダプタは12Vの2.5A用です。AC電源アダプタは取り外し可能なAC電源コネクタを使います。万国使用について図2-5をご覧ください。

図2-5. 万国プラグ任意選択を持つ万能電源アダプタ



## 2.2. ファームウェア

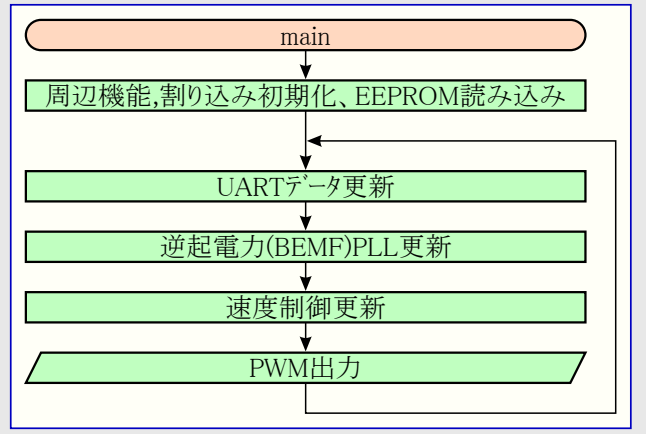
このファームウェアは3相BLDC送風機を駆動するための構成設定可能な電動機制御応用を実演するために、Atmel ATtiny461AまたはAtmel ATtiny861Aで走行するように設計されました。

感知器なし制御算法は4極電動機に対して50,000rpm以上の高速動作を提供します。失速/停止後の電動機速度自動回復を提供する強化動作のためにPLLが常に許可されます。

### 2.2.1. 制御構造

制御構造は図2-6で示されます。初期化とその後の制御繰り返しの2つの段階があります。初期化は全ての周辺機能の準備とEEPROMの読み込みを行います。制御繰り返しはUARTデータ処理、逆起電力(BEMF)PLLの更新、速度制御、PWM出力の更新を行う無限繰り返しです。

図2-6. ファームウェア主繰り返し



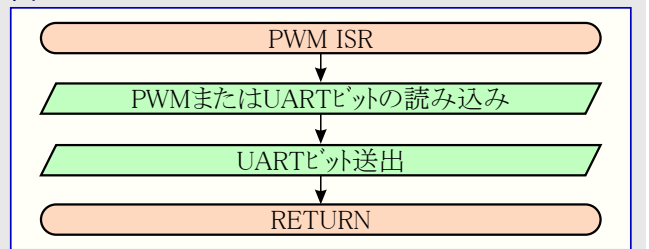
### 2.2.2. 割り込み処理ルーチン

3つの割り込み処理ルーチン(ISR)があります。2つはPWMタイマ/カウンタ1に基づき、1つはタイマ/カウンタ0に基づきます。3つのISRは次のとおりです。

1. PWM ISR
2. A/D変換器(ADC) ISR
3. 通信ISR

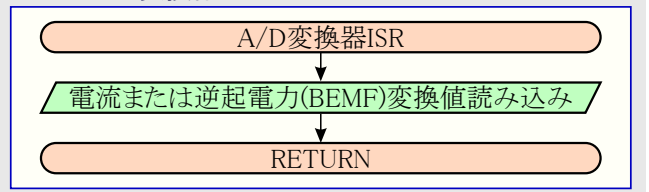
PWM ISRは主繰り返し用タイミング、PWM速度命令読み取り、UART通信用タイミングの3つの関数を扱います。UART機能のため、PWM周期は標準PC UART速度に適合させるように19,200Hzに設定されます。図2-7はPWM ISRの流れを示します。

図2-7. PWM ISR

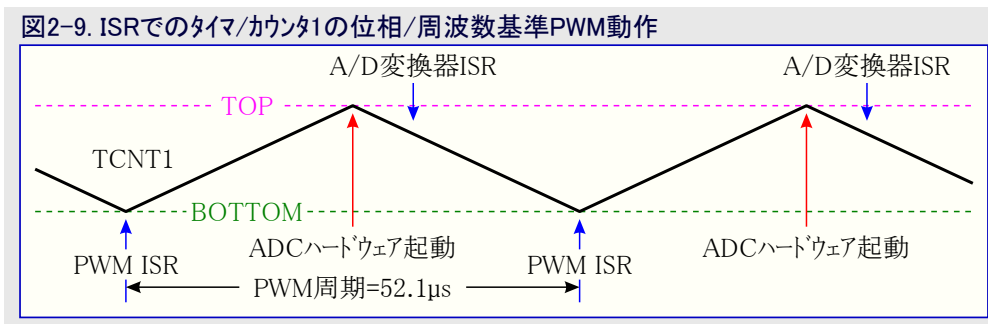


A/D変換器ISR(図2-8)は“変換完了”割り込みに基づきます。ADCはタイマ/カウンタ1からのTOP計数で変換を開始します。13μsの変換時間後にA/D変換器ISRが起動されます。A/D変換器ISRは電流または逆起電力(BEMF)の読み込みに使われます。ルーチンは毎回他のISRに交互切り替えるように構成設定されます。これは主繰り返してそれらに関するルーチンに対して利用可能となることを両方の値に許します。逆起電力採取はDCバス電圧基準の半分として平均値を計算するようにA/D変換器ISRで平均化もされます。

図2-8. A/D変換器ISR



PWM ISR、A/D変換器ISR、それとタイマ/カウンタ1の上昇/下降計数の流れ間の関連が図2-9.で描かれます。



通信ISR(図2-10.)は16ビット比較動作でのタイマ/カウンタ0に基づきます。このタイマ/カウンタは電動機速度に比例する周波数で割り込む比較値で設定されます。この周波数生成は逆起電力(BEMF)感知に使われるPLLを基本に構成します。通信割り込みは通信状態更新と、主繰り返しのPLL更新ルーチンで使われるべき逆起電力採取起動間を交互に行います。タイマ/カウンタ0は速度に比例してその周波数を変え、故に通信ISRはPWM ISRとA/D変換器ISRに関して非同期割り込みを形成します。これは図2-11.で図解されます。

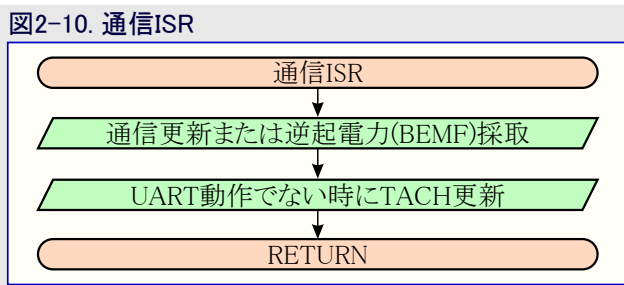
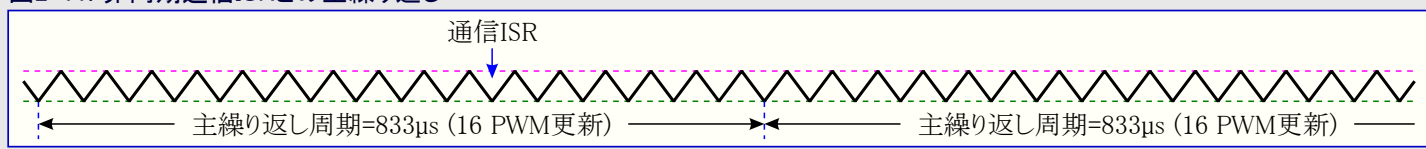
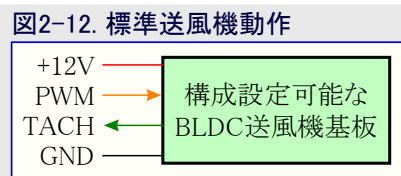


図2-11. 非同期通信ISRとの主繰り返し

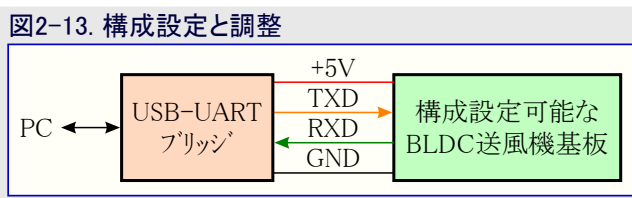


### 2.2.3. 通信

通信はいくつかの送風機応用で見られる、単一PWM入力と単一TACH(回転速度計/タコメータ)出力を転用することによって確立されます。PWM入力は代表的に送風機速度を決めるデューティサイクルである速度命令です。TACH出力は代表的に速度に比例する周波数を持つ方形波出力を表します。この構成設定は図2-12.で示されます。



PWM速度命令はUSB-UARTブリッジへのUART送信(送風機についての受信)として転用されます。TACHはUSB-UARTブリッジからのUART受信(送風機についての送信)として転用されます(図2-13.)。これらの約束はUSB-UARTブリッジで典型的に見られる印と矛盾しないように使われます。



### 2.3. 電動機制御構成設定ユーティリティ

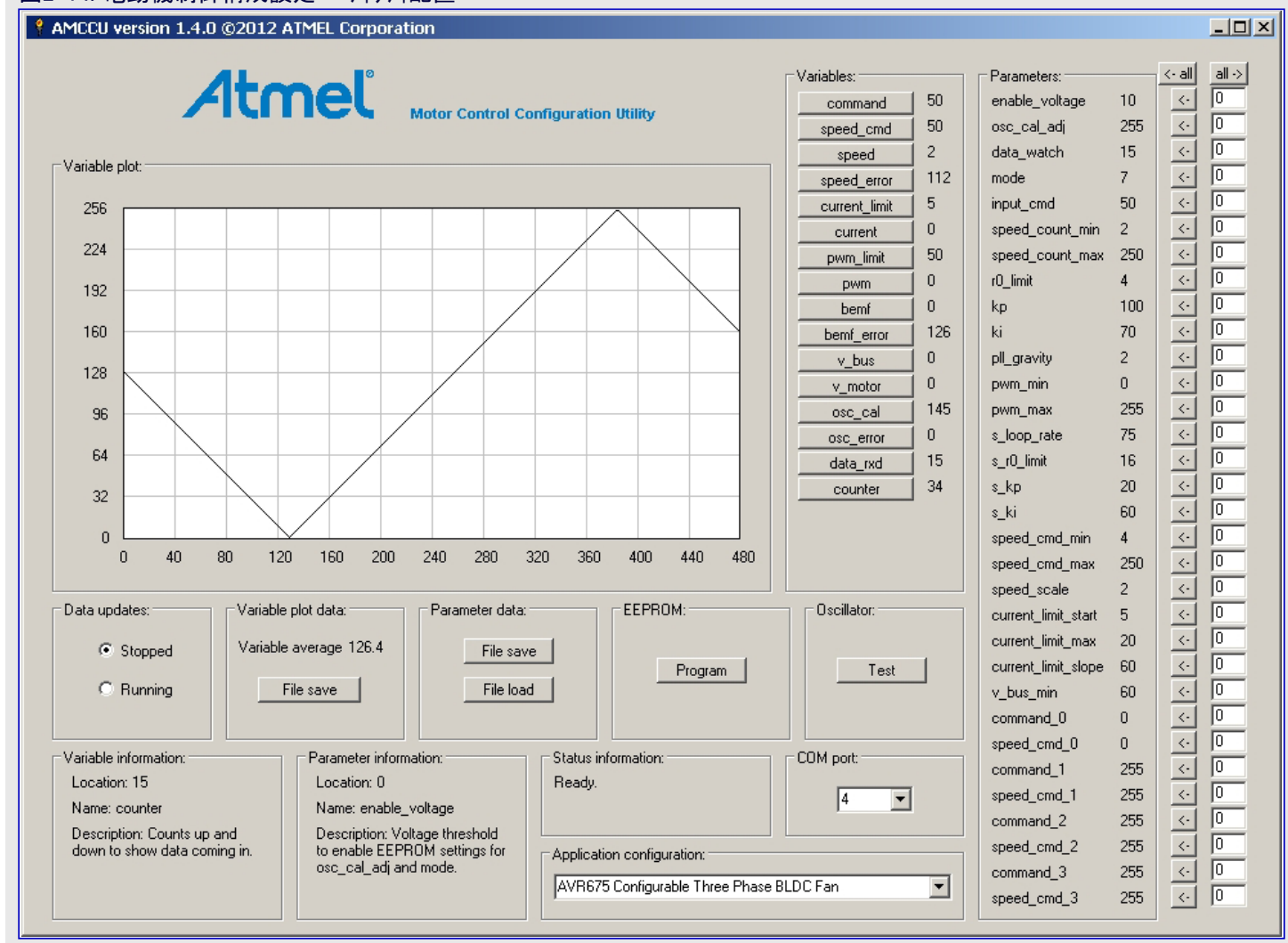
PCに基づく電動機制御構成設定ユーティリティはPCの仮想COMポートを用いる電動機性能の構成設定と調整用です。このユーティリティは以下の機能を提供します。

1. 各種送風機で動作するようにコードを独自化するためのパラメータ調整可能とそれらのパラメータのEEPROMへの送出
2. 800ms毎に更新する変数の一覧
3. 性能検査用の作図ウィンドウのような範囲で単一変数の監視を許す変数作図
4. UARTクロックに対してAtmel ATtiny461A内部発振器を比較して調整するための発振器検査
5. 簡単なファイル機能：EEPROM値を保存するためのファイルの読み込みと保存の機能、作図データを保存するためのファイル保存機能

### 2.3.1. ユーティリティの配置

電動機制御構成設定ユーティリティは1つのウィンドウで表示される全機能を持つ単一前面パネルから成ります。図2-14.は電動機制御構成設定ユーティリティの基本配置を示します。

図2-14. 電動機制御構成設定ユーティリティ配置



### 2.3.2. 変数 (Variables)

ファームウェアからの変数は概ね800ms当たり一度の割合で構成設定ユーティリティへ送られます。この変数の一覧は送風機の構成設定と調整に関して最も有用なものとして選ばれました。

### 2.3.3. 変数作図 (Variable Plot)

一覧から1つの変数を変数作図(Variable Plot)に表示することができます。この変数はまさしく他の繰り返し更新、または概ね1.6ms毎に一度送られます。完全な作図は変数一覧で800ms毎に一度更新されます。

### 2.3.4. パラメータ (Parameters)

パラメーター一覧の値も変数一覧と一緒に800ms毎に一度更新されます。構成設定と調整の処理の間、新しい値を構成設定可能な送風機に送ることができ、その新しい値は800msで更新が反映されます。更新されたパラメータはSRAMに格納され、故にそれらは電源OFF/ON後、EEPROM値にリセットされて戻されます。更新された値を格納するには、EEPROMの“Program”鈕が押されなければなりません。

### 2.3.5. ファイル機能

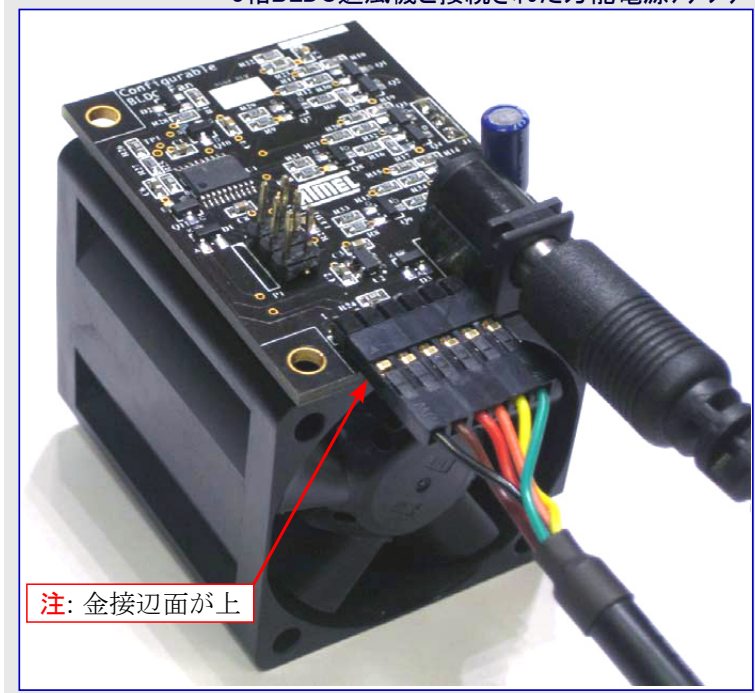
ユーティリティの構成設定、パラメータ値の読み込みと保存、変数作図データの保存をするための付加ファイル機能があります。

## 3. 系の走行

### 3.1. ハードウェア

系は図3-1.で示されるように接続されます。始めに構成設定可能なBLDC送風機PCBはUSBポートから直接給電することができ、これは送風機走行なしで電動機制御構成設定ユーティリティとの通信を許すAtmel ATtiny461Aに通電します。

図3-1. USB-UARTブリッジを持つ構成設定可能な3相BLDC送風機と接続された万能電源アダプタ



### 3.2. ファームウェア

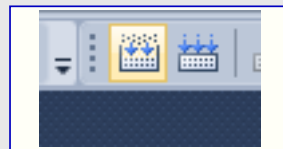
初回使用についてファームウェアは電動機制御構成設定ユーティリティ使用に先立ってATtiny461Aに取り付け(書かれ)ることが必要です。一般的なプログラミング ツールの多くと最終版のAtmel Studioを使い、標準6ピン ヘッド(P1)を通してヒューズ設定とファームウェアのISPダウンロードに対する準備があります。ファームウェアは以下の段階を用いてインストールすることができます。

1. AVRに構成設定可能な3相BLDC送風機プロジェクトをダウンロード(デバイスのプログラミングを)してください。
2. 構成設定可能な3相BLDC送風機PCBに5Vの電力を提供するためにUSB-UARTケーブルを接続してください。同時にこのコネクタが鍵部を持たないため、図3-1.でのコネクタの極性に注意してください。

**警告:** PWMピンがISPピンと共用され、これがプログラミング中にMOSFETを損傷し得るため、基板に12Vの電力を印加しないでください。

3. USBコネクタを通してISP書き込み器をPCに接続し、コネクタが鍵部を持たないため、リボン コネクタの1番ピンとPCBの1番ピンを合わせて書き込み器のリボン ケーブルをP1に接続してください。
4. Atmel Studioの最終版を持って来てください。例はこの執筆時点でAtmel Studio 6で示されます。より新しい版のAtmel Studioを使う場合、GCCコンパイラ任意選択を使って新しいCプロジェクトを開始し、Atmel ATtiny461Aを選択してください。ダウンロードした版でmain.cを置き換えてください。このプロジェクトは単一ファイルのmain.cとしてGCCコンパイラ用に使われ、故にそれは新しい版のAtmel Studioに容易に変換されます。
5. GCCコンパイラ最適化を大きさ用の-Osに選択してください。
6. コンパイラ誤りを調べるためにその解決策を構築してください(図3-2.)。

図3-2. 解決策構築釦



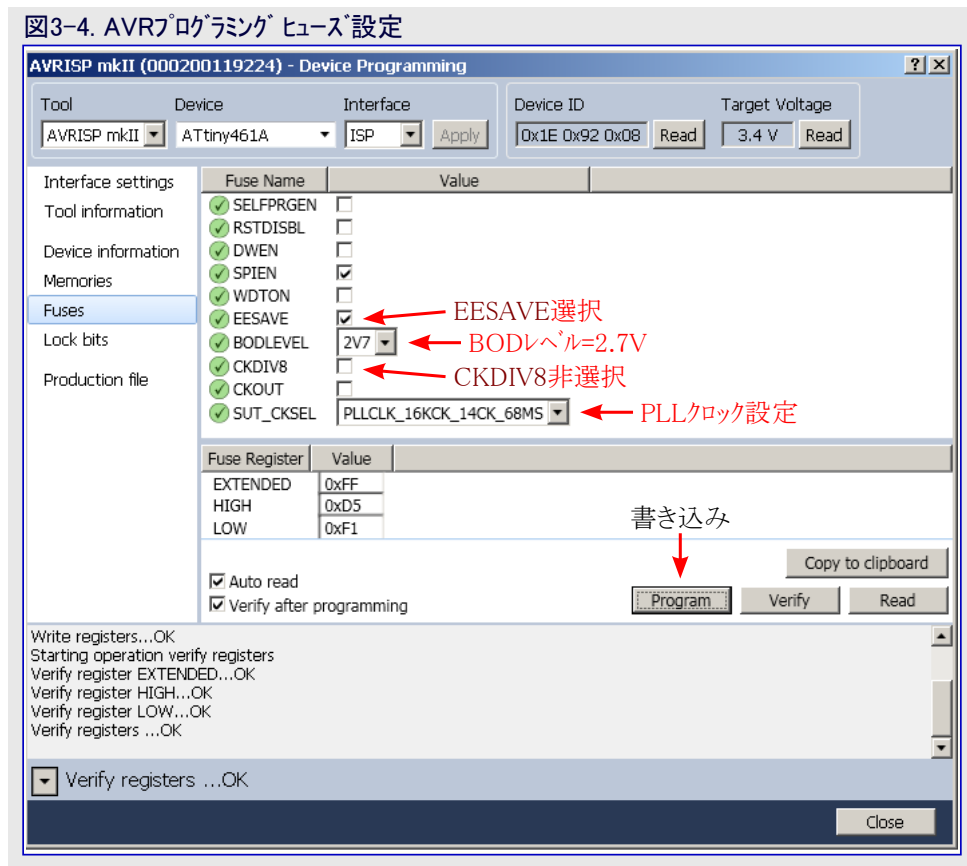
7. ヒューズ設定のためにAtmel AVRプログラミング釦を選んでください(図3-3.)。

図3-3. AVRプログラミング釦

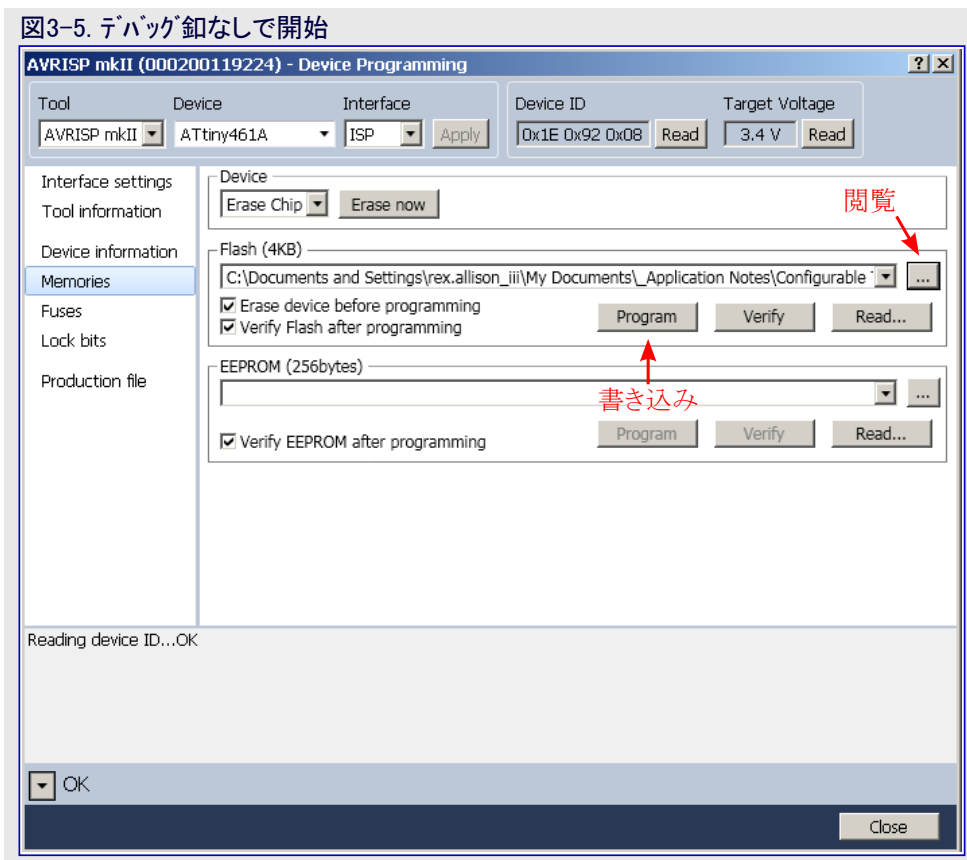




8. ATtiny461Aを接続してヒューズを図3-4.で示される構成設定に設定してください。CKDIV8は非選択であるべきで、SUT\_CKSELはPLLCK\_16KCK\_14CK\_68MSとして選択されるべきです。BODLEVELは2.7Vの低電圧検出レベル用の2V7に設定されるべきです。これはシステムクロックを内部16MHz動作に設定します。EESAVEは任意選択で、これはEEPROMの消去なしにファームウェアのダウンロード(書き換え)を許します。



9. ファームウェアをダウンロードする(書く)ためにMemories部へ誘導し、.HEXファイルを開覧して(選んで)Program鈕を押してください。



ファームウェアは使用準備可の指示器としての青LEDを点滅すべきです。

### 3.3. 電動機制御構成設定ユーティリティ

一旦ハードウェアが構成設定され、ファームウェアがAtmel ATtiny461Aのフラッシュメモリに置かれると、電動機制御構成設定ユーティリティを走行する準備が整います。

#### 3.3.1. 電動機制御構成設定ユーティリティの走行

Atmel電動機制御構成設定ユーティリティはWindows® XP用に圧縮されたzipファイルとして提供されます。このzipファイルはAtmel電動機制御構成設定ユーティリティフォルダとしてルートディレクトリ(C:¥)で解凍されるべきです。このフォルダは支援ファイルと共に“**Atmel Motor Control Configuration Utility ver1.1.0.exe**”実行可能ファイルを含みます。Windowsのインストールは全くなく、単にその.exeファイルを走らせてください。

図3-6.で示されるように選択されるべきCOMポートを要求するメッセージが変数作図ウインドウ内に現れます。COMポートを選択するために引き落とし枠を使ってください。

図3-6. 接続前のCOMポート枠

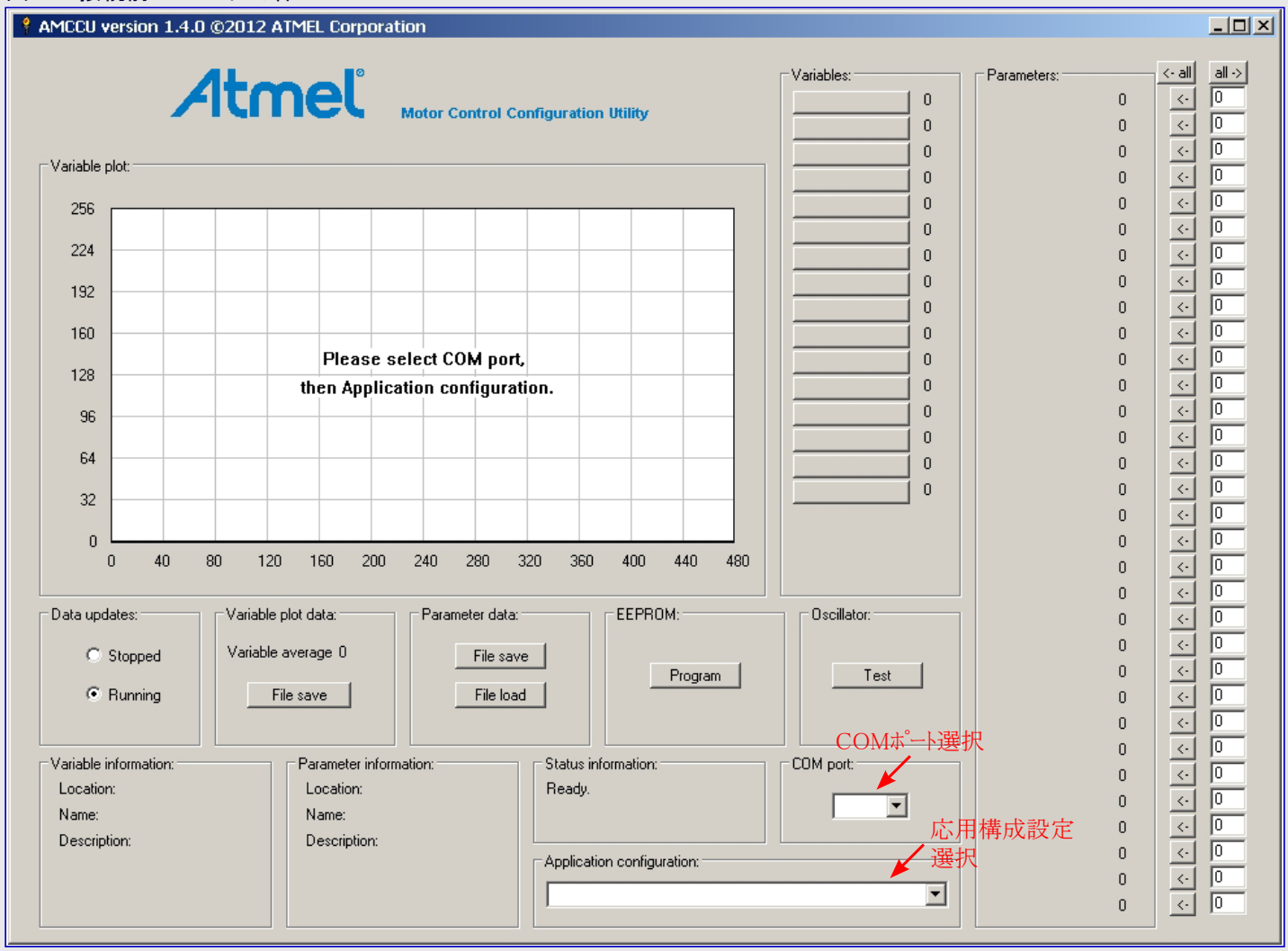
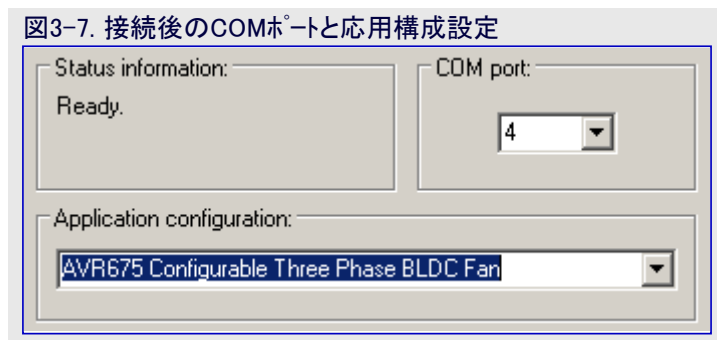


図3-7.はCOMポート4選択の例です。COMポートが分からない場合、Windows XPのスタートメニューで設定⇒コントロールパネル⇒システム⇒ハードウェア⇒デバイスマネージャ⇒ポート(COM & LPT)で得られ、USBシリアルポート(COMx)を見るべきです(ここでのxがポート番号です)。COMポート選択後、応用構成設定がAVR675用に選択されるべきです。これは電動機制御構成設定ユーティリティに於ける適切な変数とパラメータの一覧ラベルを示しました。

図3-7. 接続後のCOMポートと応用構成設定



### 3.3.2. 電動機変数と変数作図

系が電動機制御構成設定ユーティリティと通信しているなら、変数とパラメータは値で満たされるべきで、“Counter”変数は800ms毎に変更すべきです。data\_watchパラメータ(図3-8.)は15に設定され、Counter変数は図3-9.で示されるように三角波として変数作図画面で表示されるべきです。

図3-8. data\_watchパラメータ

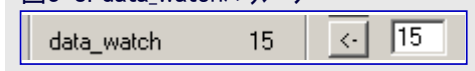
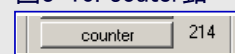


図3-9. “Counter”変数を表示する変数作図画面



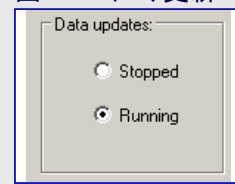
変数作図がCounterを表示しない場合、counter鈕押下によってCounter機能が変数作図画面に選択されます(図3-10.)。

図3-10. counter鈕



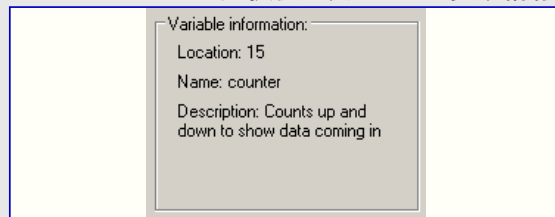
変数作図と、変数とパラメータの更新は図3-11.で示されるラジオ鈕を使って停止することができます。これは作図領域上のデータを凍結するため、変数を読むため、そしてファイルに保存されるべきデータを捕獲するのに使うことができます。

図3-11. データ更新



作図するために変数を選択する時に、一覧内の選択した変数位置、名前と説明が変数情報ウィンドウに表示されます(図3-12.)。

図3-12. Counter鈕選択後に表示される変数情報



16個の変数の完全な一覧は図3-13.で示されます。

図3-13. 変数一覧



### 3.3.3. 電動機パラメータ

電動機パラメータはAtmel ATtiny461Aの通電でSRAM内に複写されるEEPROM値です。

図3-14.はパラメータの一覧を示します。

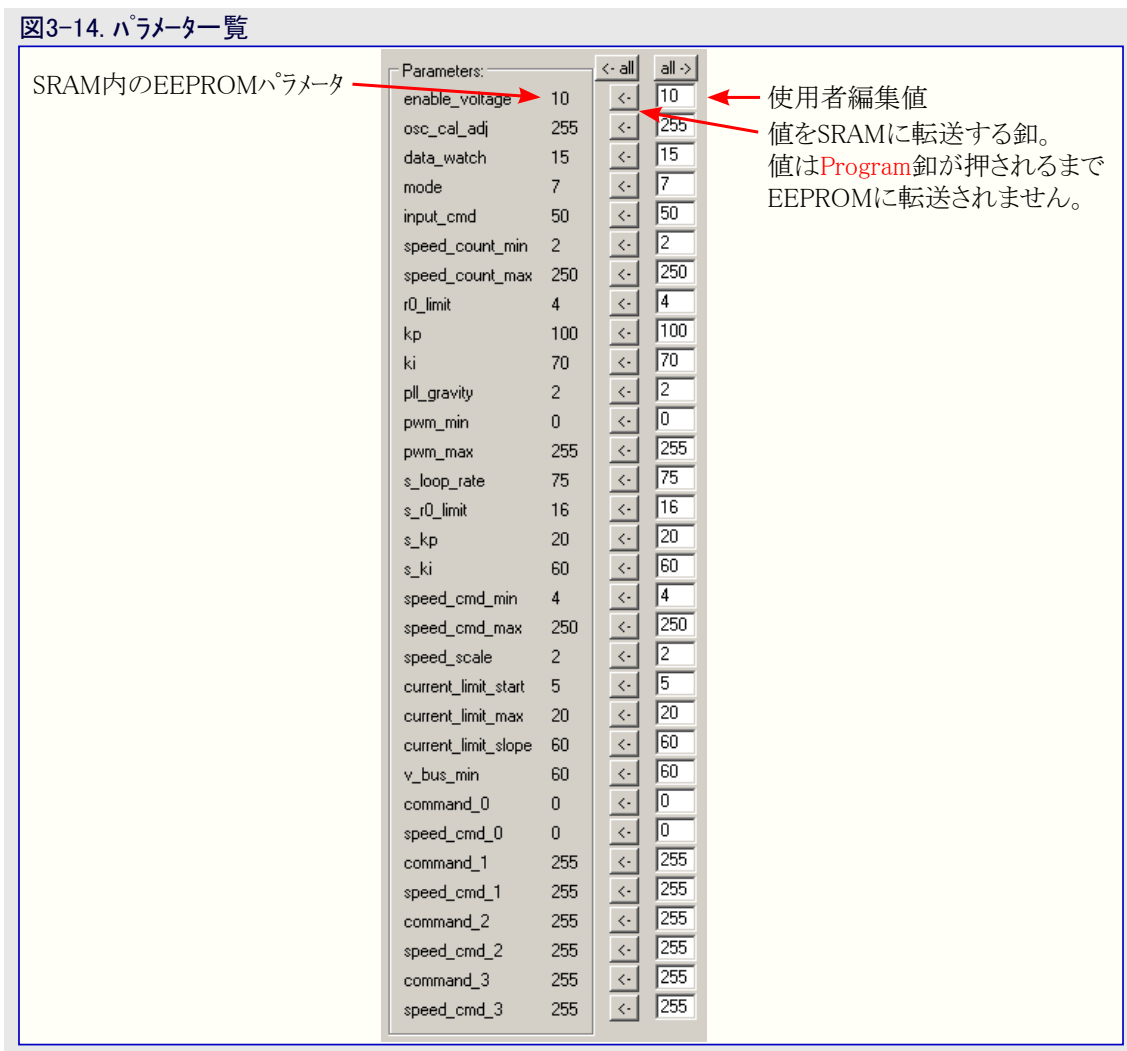


図3-15.で示される全複写釦は電動機制御構成設定ユーティリティとATtiny461A間で全ての変数を転送する素早い方法を提供します。

図3-15. 全パラメータ複写

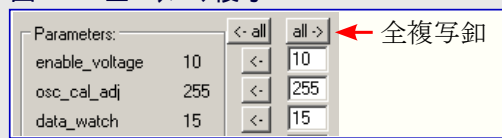
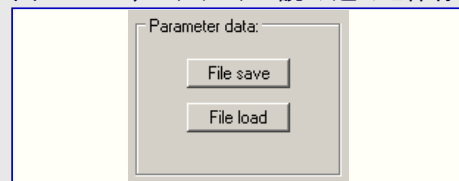


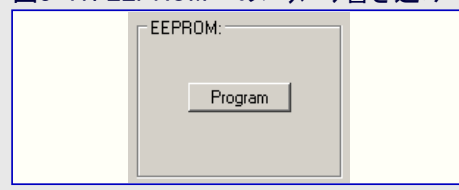
図3-14.の右端列の白い枠は構成設定ユーティリティとファイル間でのデータの編集と転送用です。ファイル転送は電動機制御構成設定ユーティリティが開始された同じディレクトリに格納されるEEPROM.txtテキストファイルへの単純なファイル保存またはファイル読み込みです(図3-16.)。このユーティリティからの上書きを防ぐため、このファイルの予備は複写されて改名されなければなりません。

図3-16. パラメータデータの読み込みと保存



SRAMに格納されたパラメータをEEPROMに転送し戻すためにProgram釦が押されます(図3-17.)。

図3-17. EEPROMへのパラメータ書き込み



input\_cmdパラメータは試験中にPWMまたは速度の命令を直接送るのに使われます。これは通信動作形態でない場合に送風機へ送られるべきPWM命令を模擬します。入力命令(input\_cmd)パラメータは図3-18.で示されます。命令は右側の入力枠を用いて直接編集し、その後中央の矢印キーを押すことができます。

注: これはAtmel ATtiny461AのSRAMへ値を転送するだけで、SRAM値をEEPROMに引き渡すには未だProgram釦の押下が必要です。

矢印キーが押されると、パラメータの説明がパラメータ情報(Parameter information)枠に現れます(図3-19.)。

図3-18. input\_cmd直接入力

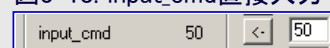
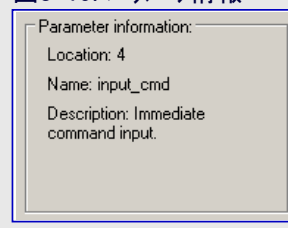


図3-19. パラメータ情報



### 3.3.4. 電圧許可

enable\_voltageは発振器調整と動作構成設定が許可される以上のDC入力電圧(v\_bus)に対する閾値を設定します。これらの設定は次の2つの項目で記述されます。enable\_voltageに対する尺度は逆起電力(BEMF)感知用分圧器とATtiny461AのA/D変換器(ADC)に基づきます。本応用に関して、尺度は次式に基づきます。

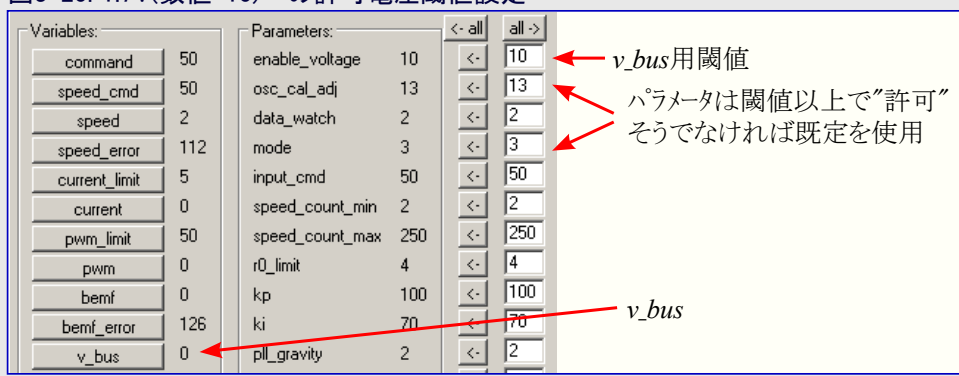
$$v_{bus} = V_{cc\_12} \times \text{分圧器/ADC全尺電圧} \times \text{ADC分解能} \dots (1)$$

DC 12V入力で、

$$v_{bus} = 12V \times 2k\Omega / (2k\Omega + 15k\Omega) / 5V \times 256 = 72 \dots (2)$$

1V当たり概ね6で、1.7V閾値の例が図3-20.で示されます。

図3-20. 1.7V(数値=10)への許可電圧閾値設定

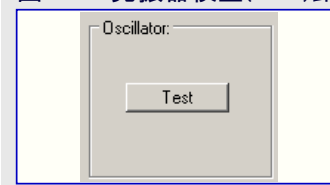


発振器工場校正とUART送受信の既定構成設定が許可され、開路PWM(動作形態=7)です。この特徴はUSB-UARTブリッジケーブルからだけ基板を給電することによって再確立されるべきPWM入力動作のように自由なPC通信の変更を許します。USB-UARTケーブルからの5VはAtmel ATtiny461Aマイクロコントローラだけに通電し、DC入力バスに給電しません。

### 3.3.5. 発振器校正

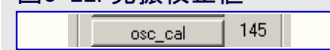
発振器校正は図3-21.で示されるようにTest釦押下によって調べることができます。内部発振器は0.2%よりも良い精度の発振器を持つUSB-UARTケーブルの発振器と比較されます。発振器校正についての更なる詳細に関してはATtiny461Aのデータシートをご覧ください。

図3-21. 発振器検査(Test)釦



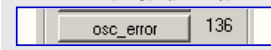
実際の発振校正値はosc\_cal変数下で表示されます(図3-22.)。これは発振校正(OSCCAL)レジスタ内に複写される工場校正値を表します。

図3-22. 発振校正値



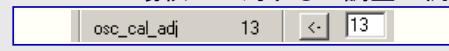
一旦校正釦が押されると、osc\_error変数が更新されます(図3-23)。この誤差は128周辺を中心にされます。これは128の値=誤差0を意味します。128を超える数値は発振器が基準値よりも遅く走行していることを意味し、128未満の数値は発振器が基準値よりも速く走行していることを意味します。最初の電動機制御構成設定ユーティリティ開始時、osc\_error値は0の無効値で始まり、故に有効な読み取りを得るために検査(Test釦)が実行されなければなりません。

図3-23. 発振校正誤差



osc\_calはosc\_cal\_adjパラメータを更新して(図3-24)、EEPROMをプログラミングすることによって調整することができます。osc\_cal\_adjは元の工場校正に対する修正係数です。値の範囲は0~32で、ここでの16は0修正に対応します。32を超える値も無視され、工場校正だけが使われます。

図3-24. 発振校正調整パラメータ、工場校正に対する-3調整の例



osc\_cal\_adj<33に対する発振器校正調整用の式は次のとおりです。

$$\text{調整後osc\_cal} = \text{osc\_cal} + \text{osc\_cal\_adj} - 16 \dots\dots\dots (3)$$

DC入力電圧がenable\_voltage閾値を超えるまで、この値が許可されないことに注意してください。

### 3.3.6. 動作形態とinput\_cmd

modeパラメータは送風機入出力の動きとinput\_cmdパラメータがどう翻訳されるかを決めます。動作形態(mode)変更は送風機の構成設定と調整を手助けします。

調整には逆起電力(BEMF)感知PLLと速度制御閉路(繰り返し)の2つの閉路があります。回転子位置感知と正しい動きでの始動を得るために、最初に逆起電力感知PLLが調整されるべきで、その後正しい速度応用に対して速度制御閉路を調整することができます。逆起電力感知PLL調整での最初の段階は動作形態を7に設定することにより、速度制御閉路を禁止して開路PWMデューティサイクル制御を使うことです(図3-25)。

図3-25. 開路PWM用入力動作形態

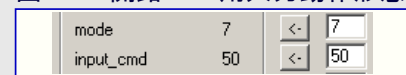


表3-1.で見られるように、8つの利用可能な動作構成設定があり、調整用既定はmode=7です。電動機が調整されて構成設定されると、mode=0はPWM入力からやって来る速度命令と回転速度計(タコメータ)としての速度出力を持つ閉路速度制御の代表的な送風機の動きを与えます。他の動作形態(1~6)は入出力と制御の各種組み合わせを許します。

注: 入力状態=0でPWMデューティサイクルはinput\_cmdパラメータを無効にし、入力状態=1についてはinput\_cmdパラメータが直接使われます。

表3-1. 動作形態任意選択

動作形態	制御状態 (ビット2)	出力状態 (ビット1)	入力状態 (ビット0)
0	0=速度制御	0=回転速度計出力	0=PWM命令入力
1	0=速度制御	0=回転速度計出力	1=UART受信
2	0=速度制御	1=UART送信	0=PWM命令入力
3	0=速度制御	1=UART送信	1=UART受信
4	1=開路PWM	0=回転速度計出力	0=PWM命令入力
5	1=開路PWM	0=回転速度計出力	1=UART受信
6	1=開路PWM	1=UART送信	0=PWM命令入力
7	1=開路PWM	1=UART送信	1=UART受信

### 3.3.7. 逆起電力感知PLL調整

逆起電力(BEMF)感知PLLは以下の4つの目標を持ちます。

1. 信頼に足る始動
2. 動的応答 - 速度変更の追従
3. 安定状態 - 定速度での安定動作
4. 失速/停止状態からの回復

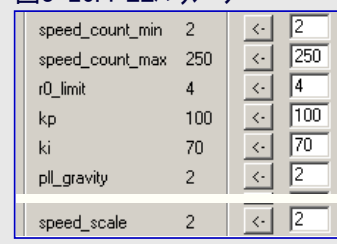
PLL調整の基本はspeed\_count\_min~speed\_count\_maxの周波数範囲設定です(図3-26)。速度計数と電動機RPM間の関連は次のとおりです。

分当たりの回転(rpm)での電動機速度は以下です。

$$\omega_m = \left( \frac{f_{CLK}}{prescaler} \right) \left( \frac{Timer\_scale}{Timer\_period} \right) \left( \frac{Speed\_count}{timer\_periods} \right) \left( \frac{2}{Npoles} \right) \left( \frac{60秒}{1分} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、  
 f<sub>CLK</sub> = 主発振器周波数 = 16MHz  
 prescaler = タイマ/カウンタ0前置分周器 = 8  
 timer\_scale = タイマ/カウンタ0 ソフトウェア前置分周器 = 2 × speed\_scale  
 timer\_period = \$FFFF  
 speed\_count = 数字での速度値 = 0~255  
 timer\_periods = 電氣的周回(状態当たり2周期×6状態)当たり12タイマ/カウンタ周期

図3-26. PLLパラメータ



$Npoles = \text{磁極数}(Npoles/2 = \text{極対}, 2/Npoles = 1/\text{極対})$   
 60秒/1分 = 1/秒から1/分への変換係数

$$\omega_m = \frac{\text{speed} \times 305 \times 2 \text{秒} \times \text{speed\_scale}}{Npoles} \dots\dots\dots (5)$$

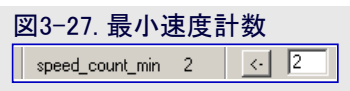
逆起電力(BEMF)感知PLLは比例積分(PID)制御部で補償されます。PIとPIDの制御器についての更なる詳細に関してはAVR221離散PID制御器応用記述をご覧ください。kpは比例利得、kiは積分利得、r0\_limitはPI制御部によって処理される誤差の量を制限する誤差締め付け部です。PLL調整はkpとkiのいくつかの繰り返しが必要です。目標は開路動作形態で電動機を走らせるkpとkiの組み合わせを見つけることです。動作は特別に滑らか、または信頼に足る必要はありませんが、これらの値は調整の開始点になります。最初の経験則はkpとkiの両方に対して小さな利得で開始することです。その後にはkiを一定に保つと同時にKpを増加してください。結果が得られない場合には、kiを増してkp値全体を通して再び検索を開始してください。この手続きの繰り返しは電動機を走らせる組み合わせを与えるでしょう。

kpとkiに対して一旦動作値が見つかり、安定状態と動的負荷変更での安定動作について調べるためにそれらは速度範囲に渡って試験されなければなりません。これは動作形態(mode=)7の時に、step命令でinput\_cmdパラメータ内に置くことによって試験することができます。例えばinput\_cmd用の入力枠内に100を入力することによって50の命令から100に跳び、送風機へ更新した命令を送るために矢印キーを押してください。大きな段階だけでなく、両方向(50⇒100と100⇒50)での段階も試験されるべきです。kpとkiのパラメータの微調整は安定状態に於けるspeed変数での波紋を最小にするように、変数作図ウィンドウでのspeed変数監視によって行うことができます。応用の必要条件によって決められるべき安定状態でのspeedの滑らかさと動的応答との相反関係が常にあります。

誤差制限部(r0\_limit)の調整は殆ど固定外状況、失速または始動に対してです。逆起電力(BEMF)感知PLLは誤差が小さくなりながら走り、故に誤差は締め付けられません。パラメータは特定の電動機の開始が難しい場合、別の別の微調整として実装されます。

### 3.3.8. 微調整開始

電動機始動に関して設定する最初のパラメータはspeed\_count\_minです。これは逆起電力(BEMF)感知PLLの最低周波数です。この周波数は電動機が状態を通して段階移動を開始するように設定されるべきです。始動中、電動機は緩やかに、しかし明確に回転すべきです。図3-27は例の送風機に対するspeed\_count\_minを示し、その値は通常1~10の範囲です。



speed\_count\_minと働くパラメータはcurrent\_limit\_startで、これは図3-28で示されるcurrent\_limit\_startパラメータで、逆起電力感知PLLが最低周波数で走行する時の電流制限閾値を設定します。



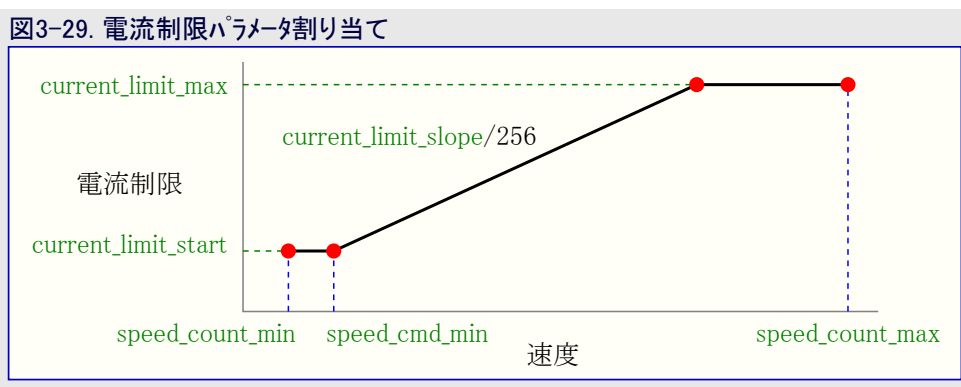
電流制限パラメータは良好な始動を与える設定可能な電流制限を許しますが、高速動作のためにより高い電流も許します。これは低い慣性と機械的な制動が非常に小さな始動電流と、より高い電流閾値を持つために電力が最高の場所で高速を必要とする送風機応用で特に重要です。高すぎるcurrent\_limit\_startの指示は始動中に電動機が発振し、同時に状態を通して段階移動します。この発振は電動機に段階位置を行き過ぎさせる大きすぎるトルクのためです。低すぎる電流は電動機の回転を得るのに小さすぎる電流を生成し得ます。これは非常に小さいまたは全く移動なしで電動機から唸り音として聞こえます。

電流制限に対する尺度は0.1Ωの電流検出抵抗(追補A.でのR23)、ADC基準電圧(3.3V)、使われるA/D変換器分解能(8ビット)から生じます。

$$\text{current\_limit尺度} = 0.1\Omega \times 256 \text{ A/D変換値} / 5\text{V基準電圧} \dots\dots\dots (6)$$

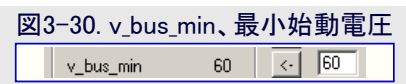
$$\text{current\_limit尺度} = 5.12 \text{ 計数值/A} \dots\dots\dots (7)$$

この例では始動に対して丁度1A、軽い過電流なしの全速走行のためには4Aが必要とされます。current\_limit\_start、current\_limit\_max、current\_limit\_slope間の関連は図3-29で示されます。



始動は限界点のv\_bus\_minによっても制御されます。これはDC入力電圧が閾値に達してしまうまで始動を防ぐ、PWMを閉ざす下限電圧です。図3-30の例では始動電圧が概ね6Vに設定されます。

$$v\_bus = 6\text{V} \times 2\text{k}\Omega / (2\text{k}\Omega + 15\text{k}\Omega) / 5\text{V} \times 256 - 55 \dots\dots\dots (8)$$



### 3.3.9. 失速/停止からの回復

機械的な障害または電力中断のために電動機が失速/停止された場合、電動機は逆起電力(BEMF)信号を生成しません。逆起電力感知PLLは固定化するための信号を持ちません。電動機を再始動するため、逆起電力感知PLLは電動機を再始動するのにその最低周波数に落とし戻さなければなりません。図3-26からのpll\_gravityパラメータ項はPLLをその最低速度の方へ偏らせるのに使われます。この項なしでのPLLは高い周波数に留まり、電動機を再始動し得ません。その最低値の方へ落ちるための周波数を得るには小さな偏倚だけが必要とされるため、代表的な値は通常、1または2です。

### 3.3.10. 速度制御調整

速度制御閉路(繰り返し)の目標は電動機がspeed\_cmdを追尾するようにPWMデューティサイクルの制御を保つことです。速度はPWM命令の出力を持つ比例積分調整器によって制御されます。この調整器を許可するため、図3-31.で示されるように動作形態(mode)は3に設定されます。表3-1.から、mode=3が速度制御と同時に電動機制御構成設定ユーティリティとのUART通信(送信と受信)を保つことが見られます。

図3-31. 速度制御入力動作形態

mode	3	<-	3
------	---	----	---

逆起電力(BEMF)感知PLLと速度制御閉路の2つの制御閉路があるため、理想的な状況は2つの閉路が相互作用を持たないことです。逆起電力PLLは回転子位置を追尾することで、故にそれは速度での急な変更に対応できなければならず、これは系での最速制御閉路を表します。相互作用から制御閉路を守るため、速度制御閉路は逆起電力感知PLLに比例して安定状態であるように見えるべきです。これはs\_loop\_rateパラメータを使うことによってより遅い速度で速度繰り返しを走行することによって達成されます。sloop\_rateは速度制御閉路(繰り返し)の更新間を更新する800msの回数を決めます。

図3-32. 速度制御パラメータ

s_loop_rate	75	<-	75
s_r0_limit	16	<-	16
s_kp	20	<-	20
s_ki	60	<-	60
speed_cmd_min	4	<-	4
speed_cmd_max	250	<-	250

s\_r0\_limitは速度誤差を挟み込み、これはPI制御閉路によって使われる速度誤差の量を制限します。s\_kpは比例利得、s\_kiは積分利得です。s\_kpとs\_kiは伝統的なPI制御調整法を用いて調整することができます(図3-32.)。

- 最初に積分項をOFFにするためにs\_ki=0に設定してください。
- 変数作図をspeedに選んでください。
- 低いs\_kpの値で電動機を開始し、比例制御で定常偏差があるでしょう。s\_kpは定常偏差をより低めるために増すことができます。いくつかの点で、大きなs\_kpの値は系内の雑音を増幅するでしょう。s\_kpの増加が雑音の多い動作を引き起こす場合、その影響を減らすために、値は下げられるべきです。
- 一旦最高のs\_kpが設定されると、s\_kiは0から増加して電動機を再始動することができます。s\_kiが増加されるため、始動で定常偏差がより速く減ります。相反関係は高いs\_ki値が電動機に速度基準を行き過ぎさせる制御繰り返しでのうねりを引き起こし得ます。応用に対する最適s\_ki値は応答速度と行き過ぎの平衡です。一般的に送風機は高速遷移が必要でなく、行き過ぎは望ましくなく、故に低いs\_ki値が最良の性能を与えます。
- 全ての最後に速度命令範囲はspeed\_cmd\_minとspeed\_cmd\_maxで設定することができます。最低速度命令は送風機が始動周波数と等しいまたはそれ以下の速度に指示されないようにspeed\_count\_min以上に設定されるべきです。speed\_cmd\_maxは255の8ビット値に制限されます。

速度制御下で信頼に足る始動を提供するため、最低デューティサイクルは電流制限部が電流をcurrent\_limit\_startに調整するのに充分高く設定されるべきです(図3-33.をご覧ください)。

図3-33. 最低PWM値

pwm_min	0	<-	0
---------	---	----	---

### 3.3.11. 速度命令割り当て

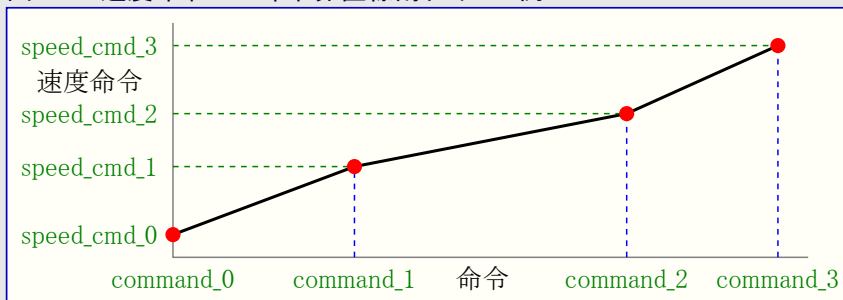
speed\_cmdへのPWM入力命令の非直線割り当ては図3-34.で示されるようにcommand\_0~3とspeed\_cmd\_0~3のパラメータによって設定することができます。

非直線割り当ての例は図3-35.で示されます。直線割り当てについては単純にcommand\_0=speed\_cmd\_0=0、command\_1=speed\_cmd\_1=255に設定し、残りの全ての値を255に設定してください。

図3-34. 割り当てパラメータ

command_0	0	<-	0
speed_cmd_0	0	<-	0
command_1	255	<-	255
speed_cmd_1	255	<-	255
command_2	255	<-	255
speed_cmd_2	255	<-	255
command_3	255	<-	255
speed_cmd_3	255	<-	255

図3-35. 速度命令への命令非直線割り当ての例



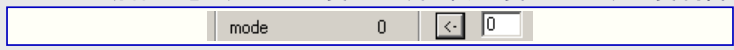


### 3.3.12. 独立送風機動作

構成設定と調整が完了した後、速度命令用のPWM入力と回転速度計(タコメータ)出力を持つ独立動作形態で送風機が動作するように、EEPROM更新が禁止されるべきです。送風機動作を構成設定するための段階は次のとおりです。

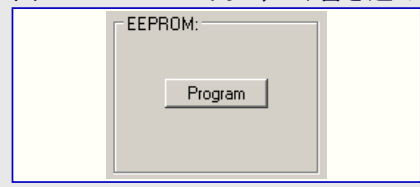
1. 先の図3-20.で示されるように1.7Vの閾値に対してenable\_voltageを10に設定するようにenable\_voltageが1.8VのATtiny461A動作電圧以下に設定されることを確実にしてください。
2. 動作形態(mode)=0構成設定は図3-36.で示され、それは表3-1.での独立型動作の既定です。

図3-36. 動作形態0、PWM速度入力、回転速度計出力、速度制御



3. これらの設定でEEPROMをプログラミング(書き込み)してください(図3-37.).これはUSB-UARTケーブルの5Vから給電されるプロセッサとUART通信を許すために0VでのDC入力電圧を持つ必要があります。

図3-37. EEPROM内パラメータ書き込み



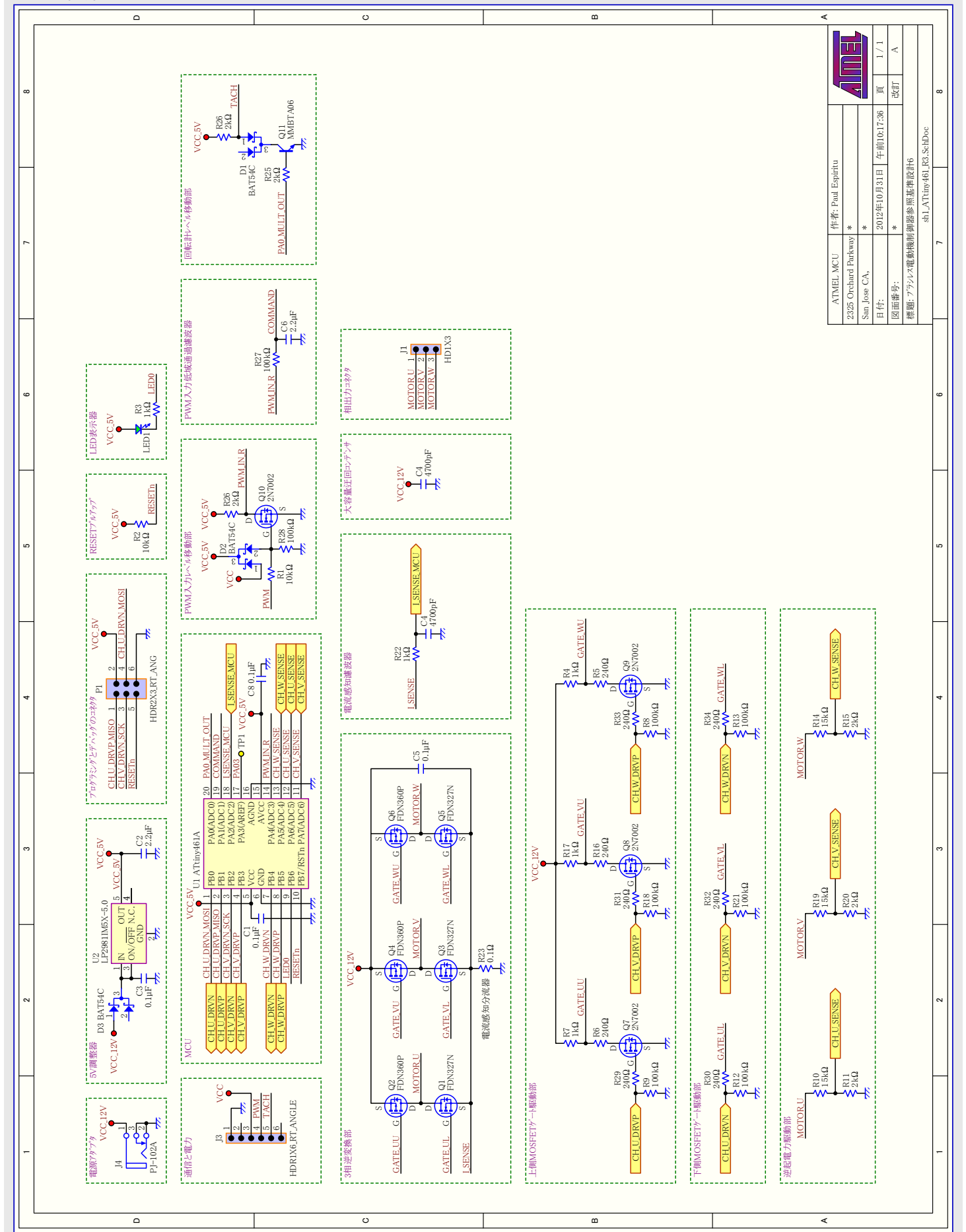
EEPROMが今やプログラミングされ(書かれ)ています。次回に電力が一巡されると、送風機はこれらの設定で通電されます。12V入力によって電力が供給される限り、シリアル通信は確立されず、Atmel ATtiny461AはPWM命令だけを受け入れます。この動作が偶然に行われた場合、通信はUSB-UARTケーブルからATtiny461Aを給電してDC入力電圧を0にすることによって常に再確立することができます。

## 4. 結び

この応用記述は感知器なし制御を実行するATtiny461Aマイクロコントローラを使う構成設定可能な3相ブラシレスDC(BLDC)送風機の構成設定と使用を記述しました。完全なハードウェアシステムは12V3相BLDC送風機、構成設定可能なBLDC送風機基板、USB-UARTブリッジケーブル、AC電源アダプタ、ATtiny461Aで走行するファームウェア、応用に対して送風機を独自化するためのPCに基づく電動機制御構成設定ユーティリティを含みます。

# 追補A. 回路図

図4-1. 回路図



ATMEL MCU	作者: Paul Espiritu
2325 Orchard Parkway	*
San Jose CA,	*
日付:	2012年10月31日 午前01:36
図面番号:	頁 1 / 1
	改訂 A
	標題: AVR675 3相BLDC送風機制御基板設計書
	sh.LATiny461_R3.SchDoc

## 追補B. キット部品一覧

説明	製造業者	部品番号
構成可能な3相BLDC送風機基板	Atmel Corporation	構成可能な3相BLDC送風機基板
12V送風機 40mm×48mm 23000rpm	NMB Technologies Corporation	1619FT-04WB86-B50
USB-UARTブリッジケーブル	FTDI, Future Technology Devices International Ltd	TTL-232R-5V
R系壁アダプタ 12V 30W	PHIHONG USA	PSAA30R-120
R系壁アダプタ USクリップ	PHIHONG USA	RPA

## 追補C. 改訂履歴

文書改訂	日付	注釈
42016A	2012年7月	初版文書公開
42016B	2012年12月	改訂履歴追加といくつかの他の更新/修正が行われました。



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](http://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

© 2012 Atmel Corporation. 不許複製 / 改訂:42016B-AVR-12/2012

Atmel®, Atmelロゴとそれらの組み合わせ、AVR Studio®, 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。Windows®は米国とその他の国に於いてMicrosoft Corporationの登録商標です。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<sup>1</sup>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 2021.

本応用記述はAtmelのAVR675応用記述(doc42016.pdf Rev.42016B-12/2012)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。