

MC68HC908QY4 を用いたファン用 低電力 BLDC モータの制御

デザイナー・リファレンス・マニュアル

M68HC08
Microcontrollers

DRM046J
(原文 DRM046)
Rev. 0
09/2004

freescale.com



MC68HC908QY4 を用いた ファン用低電力 BLDC モータの制御

デザイナー・リファレンス・マニュアル - 第0版

Radim Visinka、MCSL、Roznov 共著

BLDC モータ理論： Pavel Grasblum、MCSL、Roznov 共著

本書では、Microcontroller Unit を MCU と略して記載しています。



章

第 1 章	はじめに.....	13
第 2 章	MC68HC908QY ファミリの利点と特長	15
第 3 章	BLDC モータの理論.....	17
第 4 章	3 相 BLDC の低電圧リファレンス・デザイン.....	25
第 5 章	ハードウェア設計	29
第 6 章	ソフトウェア設計	41
第 7 章	参考資料.....	53
第 8 章	付録 A - 回路図と部品リスト	55
第 9 章	付録 B - システムのセットアップ	63

目次

第 1 章 はじめに

第 2 章 MC68HC908QY ファミリの利点と特長

第 3 章 BLDC モータの理論

3.1	BLDC モータのデジタル制御	18
3.2	パワー・トランジスタの独立スイッチング	20
3.3	パワー・トランジスタの相補スイッチング	21
3.4	転流	21

第 4 章 3 相 BLDC の低電圧リファレンス・デザイン

4.1	システムの概要	25
4.2	システムの説明	26

第 5 章 ハードウェア設計

5.1	ピンの説明	31
5.2	設計の詳細	33

第 6 章 ソフトウェア設計

6.1	データ・フロー	41
6.2	ソフトウェアの実装	45
6.3	ソフトウェアのカスタマイズ	47
6.4	ソフトウェア・リスト	51
6.5	マイクロコントローラのメモリとペリフェラルの使用	51

第 7 章 参考資料

第 8 章 付録 A - 回路図と部品リスト

8.1	回路図	55
8.2	部品リスト	59

第9章 付録B - システムのセットアップ

9.1	目次	63
9.2	ハードウェア・セットアップ	63
9.3	コントローラ・ボードのジャンパ設定	64
9.4	必要なソフトウェア・ツール	66
9.5	アプリケーションの作成とアップロード	66
9.6	アプリケーションの実行	66



図番号	タイトル	ページ
1-1	ファン用低電力 BLDC モータの制御	13
3-1	BLDC モータの断面図	17
3-2	3 相 BLDC モータへの電圧ストローク	18
3-3	3 相 BLDC パワー・ステージ	19
3-4	パワー・トランジスタの独立スイッチング	20
3-5	パワー・トランジスタの相補スイッチング	21
3-6	6 ステップの制御による固定子磁束ベクトル	22
3-7	転流直前の状態	23
3-8	転流直後の状態	23
4-1	システム・コンセプト	26
5-1	3 相 BLDC モータの制御	29
5-2	ブロック図	30
5-3	ロジック・ゲートとマイクロコントローラ	34
5-4	ホール・センサ・インタフェース	35
5-5	ユーザ・インタフェース	36
5-6	3 相 H ブリッジ (A 相)	37
5-7	電流の検出 (詳細)	38
6-1	アルゴリズムのデータ・フロー	42
6-2	閉ループ速度制御	44
6-3	ソフトウェアの実装 (概要)	45
6-4	セクタと固定子磁束ベクトル	48
8-1	ホール・センサ入力とユーザ・インタフェースを備えた マイクロコントローラ	56
8-2	パワー・ステージ	57
8-3	電源	58
9-1	BLDC モータを含むシステムのセットアップ	64
9-2	BLDC モータ・ドライブ・ボードのジャンパ設定	65



表

表番号	タイトル	ページ
2-1	デバイスの種類	15
3-1	反時計回りの転流シーケンス	24
3-2	時計回りの転流シーケンス	24
5-1	コネクタ J4 の信号	31
5-2	ジャック・コネクタ J2 の信号	31
5-3	コネクタ J5 の信号	31
5-4	ジャック・コネクタ J1 の信号	32
5-5	ジャック・コネクタ J3 の信号	32
5-6	MCU への信号	33
6-1	ホール・センサ・パターンの決定	47
6-2	反時計回りの転流ベクトルの決定	49
6-3	時計回りの転流ベクトルの決定	49
6-4	転流テーブル	50
6-5	メモリの使用	51
6-6	MC68HC908QY4 モジュールの使い方	52
8-1	部品リスト	59
9-1	BLDC モータ・ドライブ・ボードのジャンパ設定	65

第1章 はじめに

本リファレンス・デザインでは、MC68HC908QY4 を用いたファン用低電力ホール・センサ付 BLDC モータ制御の設計について説明します。

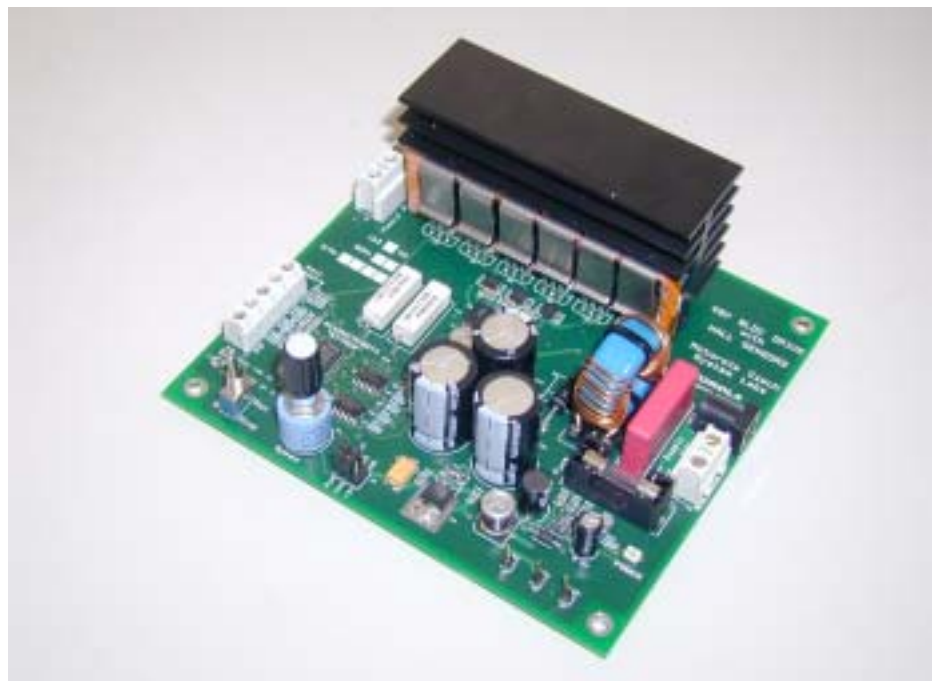


図 1-1. ファン用低電力 BLDC モータの制御

BLDC モータは、広範囲におよぶ分野で多く使用されています。機械的な整流子を持つ DC モータとは異なり、電気的な整流子を備えているため、DC モータより高い信頼性があります。また、BLDC モータでは回転子磁石が回転子の磁束を発生させるので、より効率的です。したがって BLDC モータは、白物家電、ハイエンド・ポンプやファンなど、高い信頼性と効率が要求される機器に適しています。

本リファレンス・デザインのコンセプトは、ホール位置センサを使用した閉速度ループの BLDC モータ・ドライブで、MC68HC908QY4 を用いたファン用低電力 BLDC モータ制御の設計となります。パワー・ステージは、DC48V の線間電圧で 400W の出力電力を供給します。このドライブでは、低価格の MC68HC908QY4 マイクロコントローラが使用されています。このリファレンスは、コストダウンを目指しつつ、最小のコストで最大の実装密度を実現することに重点を置いています。

本リファレンス・デザインでは、基本的なモータ理論、システム設計コンセプト、ハードウェアおよびソフトウェア設計、ハードウェア回路図、S/W リストを示します。ここで述べる設計は、ソフトウェアをカスタマイズする際のリファレンス・デザインとなります。

第 2 章 MC68HC908QY ファミリの利点と特長

MC68HC98QY4 は、低価格・高性能の 8 ビット・マイクロコントローラ・ユニット (MCU) の M68HC08 ファミリに属しています。このファミリの MCU はすべて、高機能 M68HC08 中央処理装置 (CPU08) を採用し、モジュール、メモリ・サイズ、メモリ・タイプ、パッケージ・タイプの点で多岐にわたっています。

表 2-1. デバイスの種類

デバイス	フラッシュ・メモリ サイズ	RAM メモリ・サイズ	アナログ-デジタル コンバータ	ピン数
MC68HC908QT1	1536 バイト	128 バイト	-	8 ピン
MC68HC908QT2	1536 バイト	128 バイト	4 チャンネル、8 ビット	8 ピン
MC68HC908QT4	4096 バイト	128 バイト	4 チャンネル、8 ビット	8 ピン
MC68HC908QY1	1536 バイト	128 バイト	-	16 ピン
MC68HC908QY2	1536 バイト	128 バイト	4 チャンネル、8 ビット	16 ピン
MC68HC908QY4	4096 バイト	128 バイト	4 チャンネル、8 ビット	16 ピン

特長は以下の通りです。

- 高性能 M68HC08 CPU コア
- 5V/3V の動作電圧 (V_{DD})
- 5V で 8MHz、3V で 4MHz の内部バス動作
- トリム可能な内部オシレータ
 - 3.2MHz の内部バス動作
 - 8 ビット・トリム機能 (非トリム時: $\pm 25\%$ 、トリム時: $\pm 5\%$)
- ストップ・モードからの自動ウェイクアップ機能
- オンチップ型のインアプリケーション・プログラマブル・フラッシュ・メモリ
- オンチップ型のランダムアクセス・メモリ (RAM)
- 2 チャンネル、16 ビットのタイマ・インタフェース・モジュール (TIM)
- MC68HC908QY2、MC68HC908QY4、MC68HC908QT2、MC68HC908QT4 に搭載された 4 チャンネル、8 ビットのアナログ-デジタル・コンバータ
- 5 本または 13 本の双方向入出力 (I/O) ライン、および 1 本の入力

- ウェークアップ機能付き 6 ビット・キーボード割込み (KBI)
- 低電圧検出 (LVI) モジュール
- システム保護機能
- 汎用入力ピンと共用された、内部プルアップ付き外部非同期割込みピン (IRQ)
- 汎用入出力 (I/O) ピンと共用された、マスタ非同期リセットピン (RST)
- パワーオン・リセット
- 省電力ストップ/ウェイト・モード
- MC68HC908QY4、MC68HC908QY2、MC68HC908QY1 のパッケージ：
 - 16 ピン PDIP (Plastic Dual In-line Package)
 - 16 ピン SOIC (Small Outline Integrated Circuit)
 - 16 ピン TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package)
- MC68HC908QT4、MC68HC908QT2、MC68HC908QT1 のパッケージ：
 - 8 ピン PDIP
 - 8 ピン SOIC
 - 8 ピン DFN (Dual Flat No lead)

BLDC モータ制御システムは、6 本の PWM 出力、3 本のホール位置センサ入力、そして電圧測定用の 1 本の ADC チャンネルを最低限必要とします。したがって、ADC を収容した 16 ピンの MC68HC908QY2 または MC68HC908QY4 が最適です。

第3章 BLDC モータの理論

ブラシレス DC (BLDC) モータは回転する電気機械です。固定子は、従来の誘導モータ用のものと同様に 3 相固定子であり、回転子には永久磁石が表面実装されています (「[図 3-1. BLDC モータの断面図](#)」参照)。

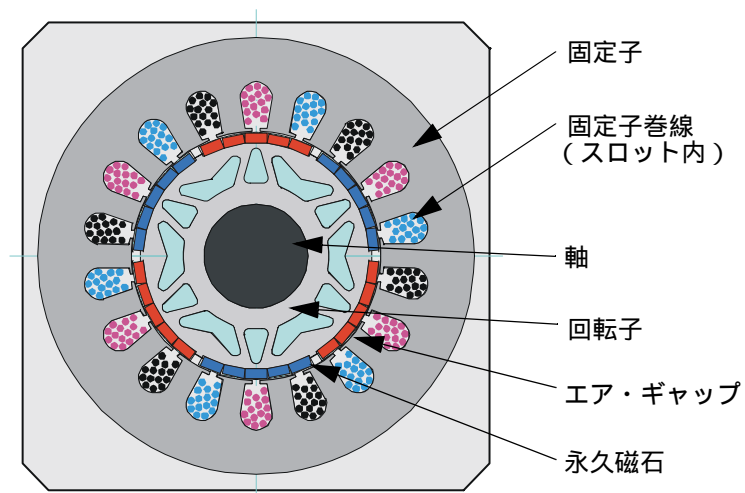


図 3-1. BLDC モータの断面図

その点で BLDC モータは、コイルが静止していて永久磁石が回転し、ブラシ付き DC モータの構造と逆になった構造と等価です。DC 整流子モータの場合、電流極性は整流子とブラシによって変化します。一方、ブラシレス DC モータでは、極性反転は回転子位置と同期してスイッチングするパワー・トランジスタによって行われます。したがって、一般に BLDC モータでは、内部または外部の位置センサによって実際の回転子位置を検出します。センサを使用しないで位置を検出することも可能です。

3.1 BLDC モータのデジタル制御

BLDC モータは、所定の回転子位置に対応した矩形電圧ストロークで駆動されます（「[図 3-2.3 相 BLDC モータへの電圧ストローク](#)」参照）。発生した固定子磁束と回転子磁石により発生した回転子磁束の相互作用によってトルクが決まり、それによってモータの速度も決まります。固定子磁束と回転子磁束の角度を 90° 近辺に保って最大のトルクが得られるように、電圧ストロークは 3 相巻線の 2 相に適切に印加する必要があります。そのため、BLDC モータは電子的な制御を必要とします。

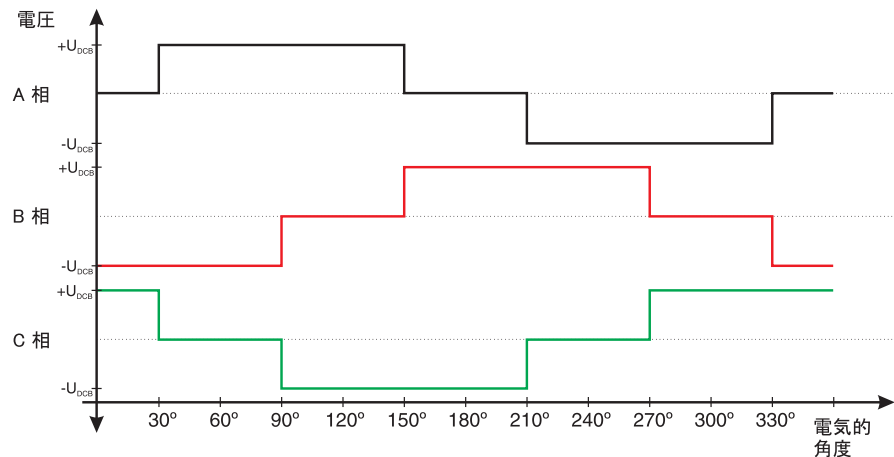


図 3-2.3 相 BLDC モータへの電圧ストローク

一般的な 3 相 BLDC モータでは、「[図 3-3.3 相 BLDC パワー・ステージ](#)」に示す標準の 3 相パワー・ステージが使用されます。パワー・ステージは、6 個のパワー・トランジスタを含み、独立モードまたは相補モードのスイッチングが行われます。

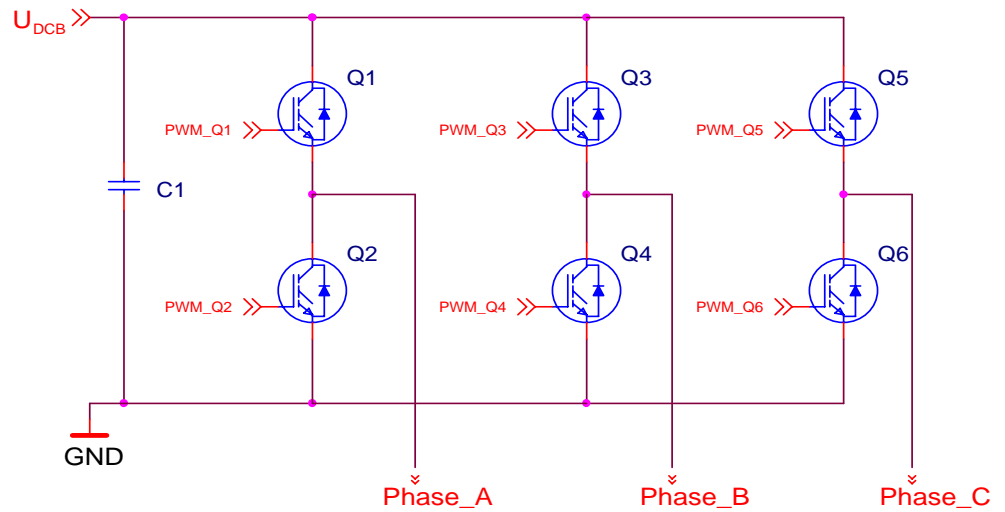


図 3-3. 3 相 BLDC パワー・ステージ

どちらのモードでも、3 相パワー・ステージは同時に 2 つのモータの相に通電します。第 3 の相は無通電の状態です（「[図 3-2. 3 相 BLDC モータへの電圧ストローク](#)」参照）。したがって、PWM 方式により 6 個の電圧ベクトルを BLDC モータに適用できます。パワー・トランジスタのスイッチングには 2 つの基本的なタイプがあります。独立スイッチングと相補スイッチングです。

3.2 パワー・トランジスタの独立スイッチング

独立スイッチングの場合、電源から BLDC モータの相に電流が流れると、2 個のトランジスタのみがオンとなります。1 番目の相では上側のトランジスタがオン、2 番目の相では下側のトランジスタがオンとなり、3 番目の相は無通電状態となります。フリー・ホイーリング時にはすべてのトランジスタがオフとなります（「[図 3-4. パワー・トランジスタの独立スイッチング](#)」参照）。

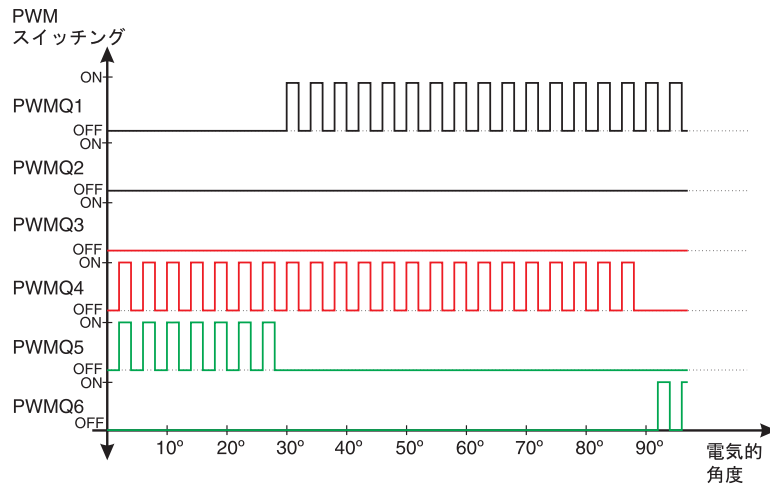


図 3-4. パワー・トランジスタの独立スイッチング

3.3 パワー・トランジスタの相補スイッチング

相補スイッチングでも、BLDC モータの相を電源に接続すると、2つのトランジスタがオンとなります。ただし、フリー・ホイーリング時では事情が異なります。独立スイッチングの場合、すべてのトランジスタがオフとなります。電流はゼロになるまで、フリー・ホイーリング・ダイオードを通して同一方向に流れます。これに反して、相補スイッチングの場合、相補トランジスタはフリー・ホイーリング時にオンとなります。したがって、電流は逆方向に流れる可能性もあります。相補スイッチングを図で表すと、「[図 3-5. パワー・トランジスタの相補スイッチング](#)」のようになります。

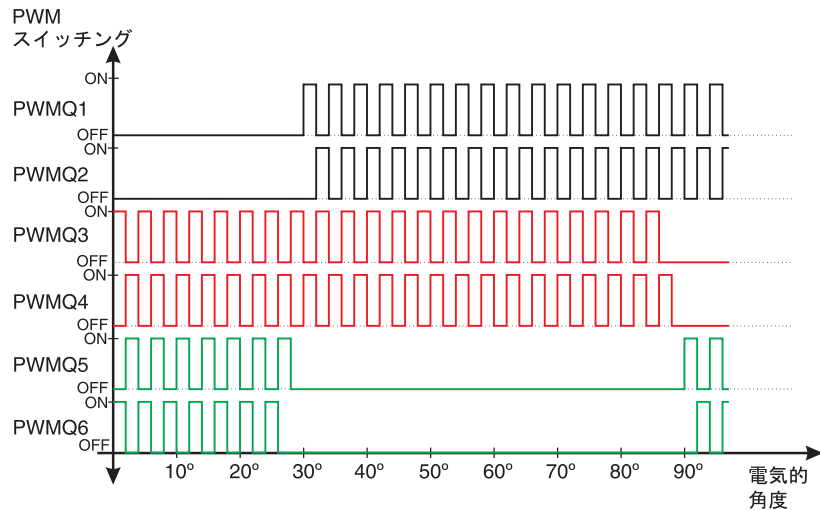


図 3-5. パワー・トランジスタの相補スイッチング

3.4 転流

転流により回転磁界が発生します。既に述べたように、BLDC モータを適切に動作させるには、固定子磁束と回転子磁束の角度を 90° 近辺に保つ必要があります。6ステップの制御により、合計 6 個の固定子磁束ベクトルが得られます。固定子磁束ベクトルは、一定の回転子位置で変化させる必要があります。回転子位置は通常、ホール・センサによって検出されます。ホール・センサは 3 つの信号を生成し、これらの組合せで 6 種類の状態が示されます。ホール・センサの各状態は、一定の固定子磁束ベクトルに対応します。ホール・センサのすべての状態、および対応する固定子磁束ベクトルを「[図 3-6. 6 ステップの制御による固定子磁束ベクトル](#)」に示します。同じ内容を表で表すと、「[表 3-1. 反時計回りの転流シーケンス](#)」と「[表 3-2. 時計回りの転流シーケンス](#)」のようになります。

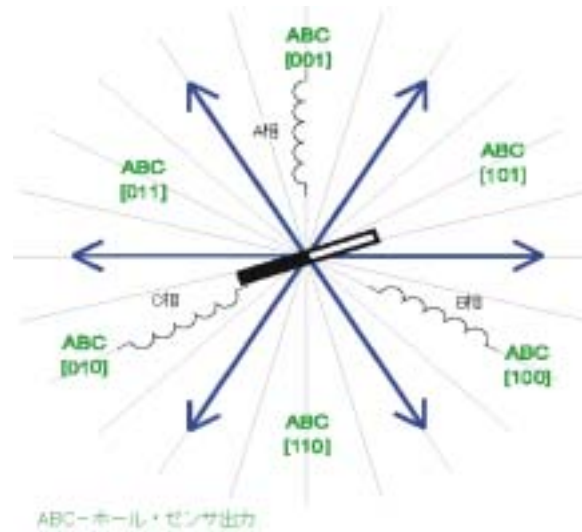


図 3-6. 6 ステップの制御による固定子磁束ベクトル

次の 2 つの図は転流プロセスを示しています。「[図 3-7. 転流直前の状態](#)」に示す実際の回転子位置は、ホール・センサの状態 ABC[011] に対応しています（「[図 3-6. 6 ステップの制御による固定子磁束ベクトル](#)」参照）。実際の電圧パターンは「[表 3-1. 反時計回りの転流シーケンス](#)」から得られます。A 相はトランジスタ Q1 によって正の DC バス電圧に接続され、C 相はトランジスタ Q6 によってグラウンドに接続され、B 相は無通電状態です。

回転子が一定の位置に到達すると（「[図 3-7. 転流直前の状態](#)」参照）、すぐにホール・センサの状態は ABC[011] から ABC[010] へと変化します。「[表 3-1. 反時計回りの転流シーケンス](#)」から新たな電圧パターンが選択され、BLDC モータに印加されます。

6 ステップの制御方式では、回転子磁束と固定子磁束の角度を正確に 90° に保つことは不可能です。実際の角度は 60° から 120° の範囲で変動します。

転流は 60° の電気的角ごとに繰り返されます。転流は角度（時間）の精度を左右する重要なものです。変動があれば、トルク・リップルが発生し、結果的にスピードにバラツキが生じます。

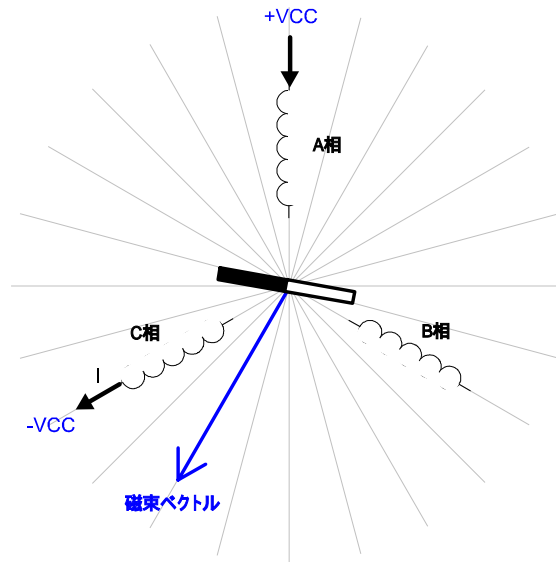


図 3-7. 転流直前の状態

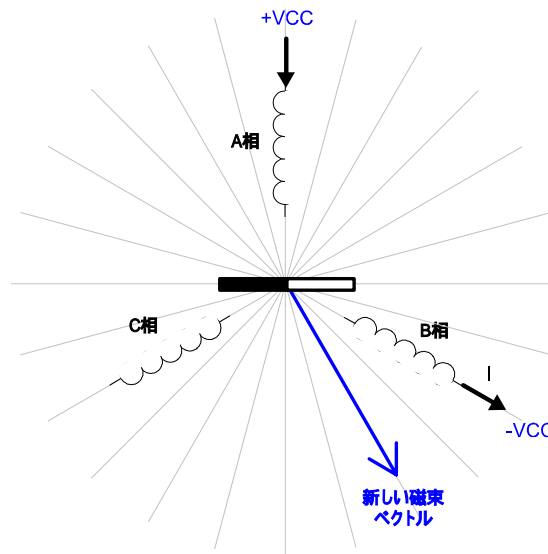


図 3-8. 転流直後の状態

表 3-1. 反時計回りの転流シーケンス

ホール・センサ A	ホール・センサ B	ホール・センサ C	A 相	B 相	C 相
1	0	1	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	NC
1	0	0	$+V_{DCB}$	NC	$-V_{DCB}$
1	1	0	NC	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$
0	1	0	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	NC
0	1	1	$-V_{DCB}$	NC	$+V_{DCB}$
0	0	1	NC	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$

表 3-2. 時計回りの転流シーケンス

ホール・センサ A	ホール・センサ B	ホール・センサ C	A 相	B 相	C 相
1	0	1	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	NC
0	0	1	NC	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$
0	1	1	$+V_{DCB}$	NC	$-V_{DCB}$
0	1	0	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	NC
1	1	0	NC	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$
1	0	0	$-V_{DCB}$	NC	$+V_{DCB}$

第 4 章 3 相 BLDC の低電圧リファレンス・デザイン

4.1 システムの概要

このシステムの設計は、3 相 BLDC モータを駆動することを目的としています。このリファレンス・デザインのパフォーマンス仕様は以下の通りです。

- ホール・センサを使用した BLDC モータの電圧制御
- MC68HC908QY2/4 マイクロコントローラ搭載のボード
- +48V_{DC} の電源電圧 (+36V_{DC} ~ +56V_{DC})
- 最大 200W の電力 (パワー・デバイスの定格: 100V、57A)
- 制御方式:
 - ホール・センサの信号による位置検出
 - 閉速度ループによる BLDC モータ電圧制御
 - ホール・センサによる速度測定
 - 一方向の回転
 - モータ / ジェネレータ・モード
 - 回転子の位置決めを必要としない、任意のモータ位置からの起動
 - モータ起動前に行われる、MOSFET プレドライバ・ブートストラップのプレチャージ
 - 750 RPM の最低速度 (使用されるモータに依存)
 - 4000 RPM の最高速度 (使用されるモータに依存)
- 手動インタフェース (ラン / ストップ・スイッチ、速度ポテンシオメータ、パワーオン LED)
- 端子を通したユーザ・インタフェースの接続も可能
- フォルト保護:
 - DC バス過電流保護 (ハードウェア / ソフトウェア)
 - DC バス低電圧保護 (ソフトウェア)
 - DC バス過電圧保護 (ソフトウェア)
 - ホール・センサ損失 (ソフトウェア)
- 電源
 - 電源ライン入力のヒューズ
 - 過渡電圧サプレッサ (60 V)
 - ライン・チョーク (電流制限値 8A)

4.2 システムの説明

「**図 4-1. システム・コンセプト**」にブロック図を示します。システムの構成は以下の通りです。

- MC68HC908QY4 マイクロコントローラ搭載の BLDC モータ・ドライブ・ボード
- ホール・センサ付き BLDC モータ

MCU MC68HC908QY4 は、主な制御アルゴリズムを実行します。また、ユーザ・インタフェースとフィードバック信号により、3相インバータ用の3相 PWM 出力信号を生成します。

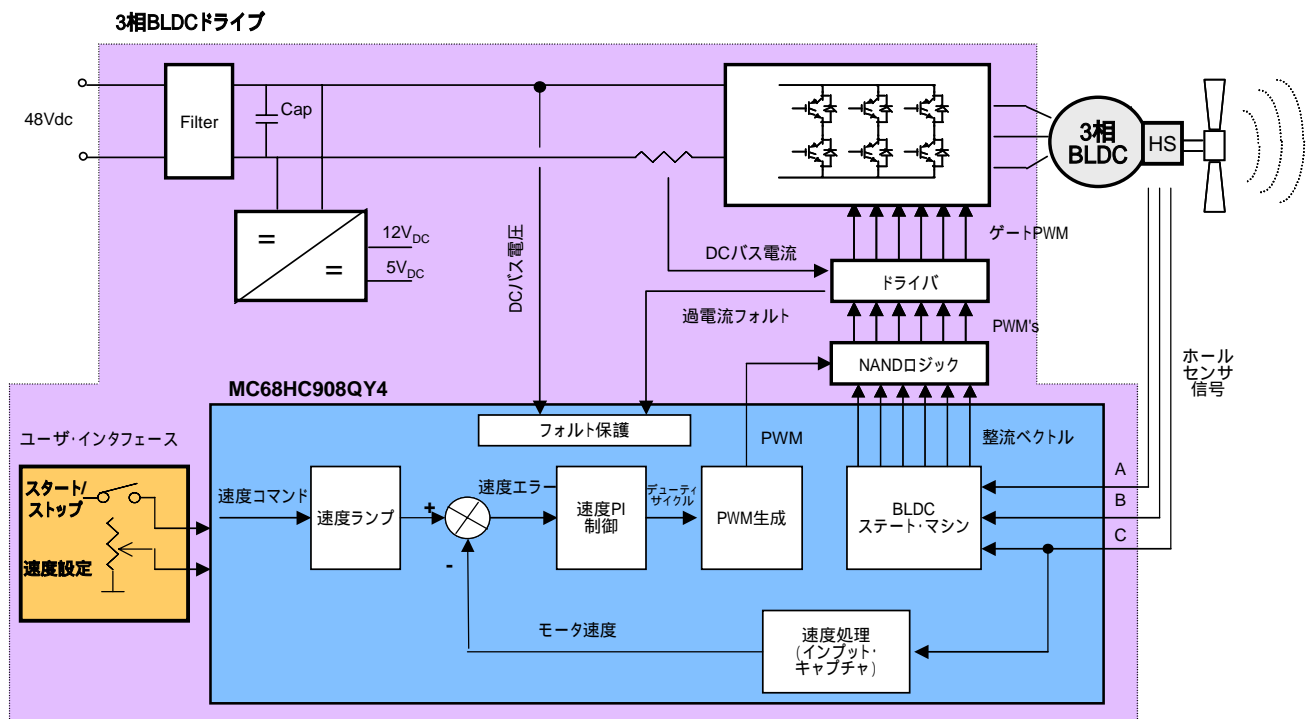


図 4-1. システム・コンセプト

4.2.1 6チャンネルPWMの生成

MC68HC908QY4の6本の出力ピンは、パワー MOSFET の制御で使用されます。MC68HC908QY4は、2本のチャンネルを持つタイマを1個のみ搭載しているため、ゲート信号の生成には、汎用 I/O (GPIO) ピンが必要です。汎用 I/O ピンによる PWM 生成の方法としては、以下の2つが考えられます。

- GPIO による S/W PWM 生成
- MCU タイマと外部ロジックによる PWM 生成

一番目の方法では、個々のピンで任意の PWM を生成できます。オンチップ・タイマのアウトプット・コンペアおよびオーバフロー ISR は、出力ピンを切り替えて必要な PWM パルスを得るための基準イベントにすることができます。出力は S/W によってのみ制御されます。この方法の利点は、個々のピンを3相ゲート・ドライバに接続するハードウェアの単純な仕組みにあります。しかしながら、ソフトウェア割込みサービスと割込み待ち時間により、PWM のデューティ・サイクルに相当な変動があります。PWM のデューティ・サイクルを 0% と 100% の限界に近付けるのは、ソフトウェアの実行時間の点で困難となります。また、各 PWM エッジで優先度の最も高い PWM 割込みが頻繁に発生するため、MCU に過負荷が発生するという問題もあります。結果として、この方法は限られた場合でしか使用できません。

二番目の方法では、ハードウェアが複雑になるという欠点はあるものの、より正確な出力制御信号が得られます。PWM はオンチップ・タイマのアウトプット・コンペア機能により生成され、汎用ピンは PWM を対応する3相ゲート・ドライバへ入力します。このような接続形態は、パワー・ステージと BLDC モータを独立したユニポーラ・モードで制御することを可能にします。一方、2つの異なる位相の1つの上側スイッチと1つの下側スイッチに同一の PWM が常に存在することになります。他のスイッチはオフとなります。利点は、安定した PWM 信号が得られるほか、0 ~ 100% のデューティ・サイクルを実現でき、MCU の過負荷を避けられることです。欠点としては、ハードウェアの複雑さがあります。この接続形態が、BLDC モータ・ドライブのリファレンス・デザインで採用されています。

4.2.2 制御アルゴリズム

ユーザ・インタフェースの状態は定期的にスキャンされ、モータの速度はホール・センサからのエッジを検出するたびに測定されます（速度の測定には、1つの相のみ使用します）。制御信号（ラン/ストップ・スイッチ、スピード・ポット）の状態により、速度指令が計算されます。加速/減速指令に対してのランプ機能も備わっています。実際の速度指令と測定された速度を比較することで、速度エラーが発生します。この速度エラーは速度 PI コントローラに入力され、PWM のデューティ・サイクルが修正されます。

ホール・センサ信号は、速度制御ループで個別にスキャンされます。ホール・センサ信号に従って、適切な転流ベクトルが選択されて MCU 出力ピンに与えられます。

PWM のデューティ・サイクルと転流ベクトルによって、BLDC パワー・ステージへの PWM 制御信号が決まります。PWM はタイマ・ピンのアウトプット・コンペア機能によって生成され、6本の GPIO ピンは転流ベクトルによってセット/クリアされます。外部にある6個の NAND ロジック・ゲートは、生成された PWM 信号を MOSFET ブレドレイバに入力します（「[図 5-3. ロジック・ゲートとマイクロコントローラ](#)」参照）。

上側の MOSFET ドライバのブートストラップ・コンデンサは、モータ起動前のプレチャージを必要とします。したがって、3 個の下側の MOSFET は、モータの起動前に 10 msec の間だけオンになります。こうした動作の結果、ブートストラップ・コンデンサのチャージが可能となり、モータの起動が確実に行われます。

4.2.3 保護機能

モータは減速時に発電機として働くことができます。発電機の状態では DC バス・コンデンサがチャージされ、その電圧は最大電圧を容易に超える恐れがあります。そのため、DC バス電圧を測定して制限値と比較します。減速時に過電圧が発生した場合、減速は中断され、モータは一定の速度で回転して DC バス・コンデンサを放電します。その後、減速が再開されます。

このシステムにはフォルト保護機能があります。DC バス電流はハードウェアでチェックされ、過電流の検出時にはフォルト信号が生成されます。このフォルト信号が MCU 割込み (IRQ) によって処理されると、ソフトウェアは直ちに PWM 出力をディセーブルにします。DC バス電圧は制御処理の実行中に測定されます。過電圧または低電圧があった場合、ドライブはフォルト状態になります。上記のフォルトが発生すると、モータ制御 PWM 出力はドライブ保護のためにディセーブルとなります。システムは、ラン/ストップ・スイッチの操作によって再びイネーブルにすることができます。

デザイナ・リファレンス・マニュアル — DRM046

第5章 ハードウェア設計

3相 BLDC モータ・ドライブは、MC68HC908QY4 マイクロコントローラで制御されるドライブ・ボード (+48V_{DC}、200W) です。このドライブ・ボードは、利用可能なリファレンス・デザインを提供すると共に、小型 BLDC モータのソフトウェア開発プラットフォームとしての役割も果たします。

BLDC モータ用に一般に使用されるホール・センサからはフィードバック信号が得られるので、3相 BLDC モータを閉速度ループで制御することが可能です。



図 5-1. 3相 BLDC モータの制御

リファレンス・デザインの特長は以下の通りです。

- 出力制御ロジック回路を備えた、ボード搭載型の MC68HC908QY4 マイクロコントローラ
- プルアップとフィルタを持つ 3 相ホール・センサ入力
- ホール・センサの電源を $5V_{DC}$ または $12V_{DC}$ に選択可能
- 以下の装置を収めた入力 $48V_{DC}$ ($+36V_{DC} \sim +56V_{DC}$)
 - 電源ライン入力のヒューズ
 - 過渡電圧サプレッサ (60V)
 - ライン・チョーク (電流制限値 8A)
- 3 相 MOSFET ゲート・プレドライバ IR2132
- 3 相ブリッジ・インバータ (6-MOSFET 100 V、57 A)
- DC バス過電流保護用の DC バス電流シャント抵抗
- DC バスの 10A のスレッシュホールドに設定された DC バス過電流フォルト生成回路
- 電源オン LED 付き、ボード搭載型の低電圧電源 (5V/200mA、12V/400mA)
- 手動制御インタフェース (スピード・ポット、ラン/ストップ・スイッチ)
- 外部ユーザ・インタフェース (オプション) 用の端子

「[図 5-2. ブロック図](#)」にシステム・アーキテクチャのブロック図を示します。

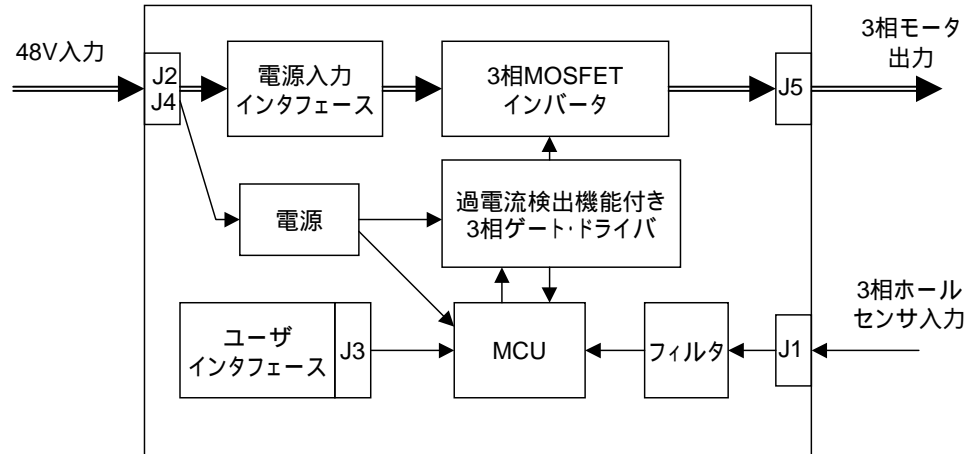


図 5-2. ブロック図

5.1 ピンの説明

5本のコネクタに入力と出力があります。以下、各コネクタのピンについて説明します。

5.1.1 電源入力コネクタ J4、J2

電源入力コネクタ J4 は、ボードの前面に実装されています。このピンには、 $36V_{DC}$ ~ $56V_{DC}$ の電圧が印加されます。電源は「[表 5-1. コネクタ J4 の信号](#)」で示す正しい極性で接続することが極めて重要です。

電源のジャック・コネクタ J2 は、デモ用に追加されたものです。

表 5-1. コネクタ J4 の信号

ピン番号	信号名	説明
1	GND	電源グラウンド
2	+48V _{DC}	電源 +48V _{DC}

表 5-2. ジャック・コネクタ J2 の信号

ピン番号	信号名	説明
1	+48V _{DC}	電源 +48V _{DC}
2	GND	電源グラウンド
3	GND	電源グラウンド

5.1.2 モータ出力コネクタ

モータへの電源はコネクタ J5 から供給されます。相出力は Phase_A、Phase_B、Phase_C と表示されています。ピンの割り当てについては、「[表 5-3. コネクタ J5 の信号](#)」を参照してください。

表 5-3. コネクタ J5 の信号

ピン番号	信号名	説明
1	Phase_A	Phase_A は、モータの A 相に電力を供給します。
2	Phase_B	Phase_B は、モータの B 相に電力を供給します。
3	Phase_C	Phase_C は、モータの C 相に電力を供給します。

5.1.3 ホール・センサ入力

ホール・センサからの入力はコネクタ J1 に入ります。ピンの割り当てについては、「[表 5-4. ジャック・コネクタ J1 の信号](#)」を参照してください。ホール・センサ用電源の電圧レベルとして、設定用の 0 抵抗 R41 または R42 によって +12V_{DC} または +5V_{DC} を選択できます。

警告： 抵抗 R41 および R42 の両方をハンダ付けしないでください。+5V_{DC} と +12V_{DC} のレールの間でショートするので、絶対に行わないでください。

表 5-4. ジャック・コネクタ J1 の信号

ピン番号	信号名	説明
1	GND	グラウンド
2	HS_A	ホール・センサ - A 相
3	HS_B	ホール・センサ - B 相
4	HS_C	ホール・センサ - C 相
5	HS_Power	ホール・センサの電源 - R41 をハンダ付けした場合、HS_Power = +12V _{DC} - R42 をハンダ付けした場合、HS_Power = +5V _{DC}

5.1.4 ユーザ・インタフェースの選択

ユーザ・インタフェースは、速度ポテンシオメータとラン/ストップ・スイッチから成ります。それぞれの信号は共にジャンパを通して MCU に接続されます。必要に応じて、ボード搭載のインタフェースを取り外し、外部のユーザ・インタフェースをヘッダ J3 に接続しても構いません。

ピンの割り当てについては、「[表 5-5. ジャック・コネクタ J3 の信号](#)」を参照してください。

表 5-5. ジャック・コネクタ J3 の信号

ピン番号	信号名	説明
1	スピード・ポット	アナログ速度基準 0 ~ 5V
2	ラン/ストップ・スイッチ	ラン・イネーブル
3	PTA4	ADC2 のポート A ピン 4
4	PTA3	GPIO のポート A ピン 3
5	+5V _{DC}	+5V _{DC} 電源
6	GND	グラウンド

5.2 設計の詳細

以下、3相 BLDC モータ・ドライブの回路について詳細に述べます。「[5.2.1 ロジック・ゲートとマイクロコントローラ](#)」では出力ロジック・ゲートとマイクロコントローラについて、「[5.2.2 ホール・センサ・インタフェース](#)」ではホール・センサ・インタフェースについて、「[5.2.3 ユーザ・インタフェースとブートローダ](#)」ではユーザ・インタフェースとブートローダ・インタフェースについて、それぞれ説明します。また、「[5.2.5 3相 Hブリッジ](#)」では3相 Hブリッジの1つの相について、「[5.2.6 電流の検出](#)」ではDC バス過電流フィードバックについて、「[5.2.7 電源](#)」ではボード搭載の電源について、それぞれ説明します。

5.2.1 ロジック・ゲートとマイクロコントローラ

マイクロコントローラは本システムの頭脳にあたる部分です。ユーザ・インタフェース信号、ホール・センサ信号、DC バス電圧をチェックして、3相 Hブリッジ用に6個の信号を生成します。その接続形態を「[図 5-3. ロジック・ゲートとマイクロコントローラ](#)」に示します。

各インタフェース信号は、「[表 5-6. MCU への信号](#)」で示すように MCU に接続されます。

表 5-6. MCU への信号

信号	MC68HC908QY4 ピン
ホール・センサ A	PTB7
ホール・センサ B	PTB6
ホール・センサ C	PTA1 / TCH1
A 相上側	PTB0
A 相下側	PTB1
B 相上側	PTB2
B 相下側	PTB3
C 相上側	PTB4
C 相下側	PTB5
PWM/ イネーブル	PTA0 / TCH0
フォルト入力	PTA2 / IRQ
DC バス電圧	PTA5 / AD3
スピード・ポット	PTA4 / AD2
ラン/ストップ・スイッチ	PTA3

MC68HC908QY4 のすべての信号が使われます。

6本の出力 PTB0 ~ PTB5 は、パワー MOSFET を制御する目的で使われます。これらは、NAND ゲート・ロジックを通してオープン・コレクタおよび対応するプルアップに接続されています。PWM は TCH0 で生成され、個々のピンである PTB0 ~ PTB5 から、対応する 3 相ゲート・ドライバへ入力されます。

電源投入時もしくは電源切断時には、同一相の上側および下側のパワー・トランジスタを同時にオンにすることを避ける必要があります。論理状態は電源投入時に必ずしも定義されているわけではないので、コントローラの電源電圧が標準の動作レベルを下回る際には、すべてのパワー・トランジスタをオフ状態に保たなければなりません。3 相ゲート・ドライバ IR2132 はネガティブ・ロジック入力を持っているため、プルアップ抵抗 R35 ~ R40 によってドライバ出力がディセーブルされます。また、MCU ピンがハイインピーダンス入力として設定されていると、電源投入時に NAND ロジック・ゲートはプルダウン抵抗 R28 によってセーフ状態となります。したがって、すべてのパワー・トランジスタは電源投入時と電源切断時にオフとなります。

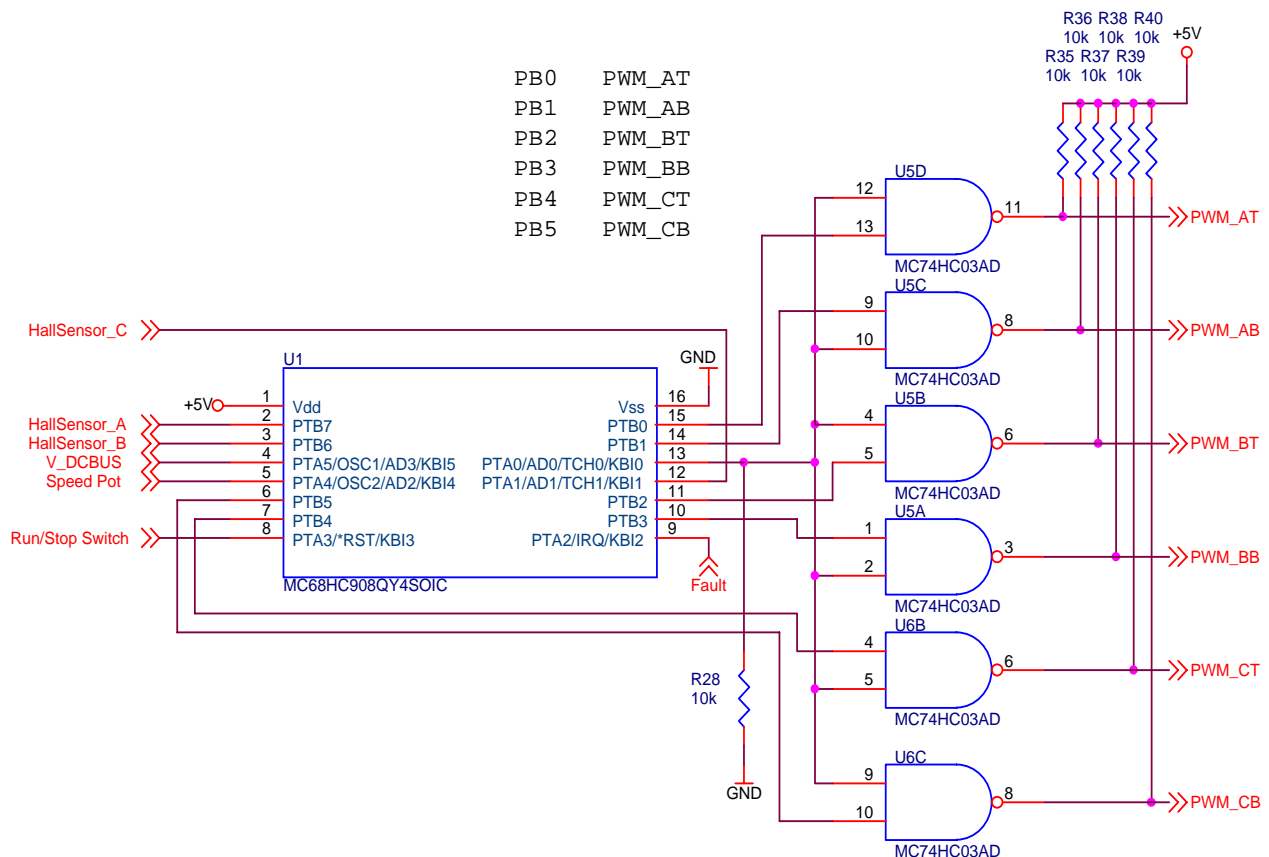


図 5-3. ロジック・ゲートとマイクロコントローラ

5.2.2 ホール・センサ・インタフェース

ホール・センサ・インタフェースは、フィルタリングされたホール・センサ信号をマイクロコントローラに与えます。3つの相信号のすべてに対してプルアップが実装されています。J1 コネクタのピン5の電圧としては、設定用のゼロ 抵抗 R41 および R42 によって +12V_{DC} または +5V_{DC} を選択できます。

警告： 抵抗 R41 および R42 の両方をハンダ付けすると、+5V_{DC} と +12V_{DC} の間でショートするので、絶対に行わないでください。

転流用にホール・センサ入力を使用するブラシレス・モータの場合、センサ入力のノイズ耐性は設計の重要なポイントです。不適切な状態への転流を行ってもモータが円滑に動作できないので、センサ入力のノイズは重大な問題となります。ノイズ処理を容易にするために、「[図 5-4. ホール・センサ・インタフェース](#)」で示すようにセンサ入力には 1000 nsec の単極フィルタによるフィルタ処理が施されます。また、約 1k という比較的小さい抵抗値のプルアップ抵抗を使用しているため、ノイズ耐性がさらに高められています。

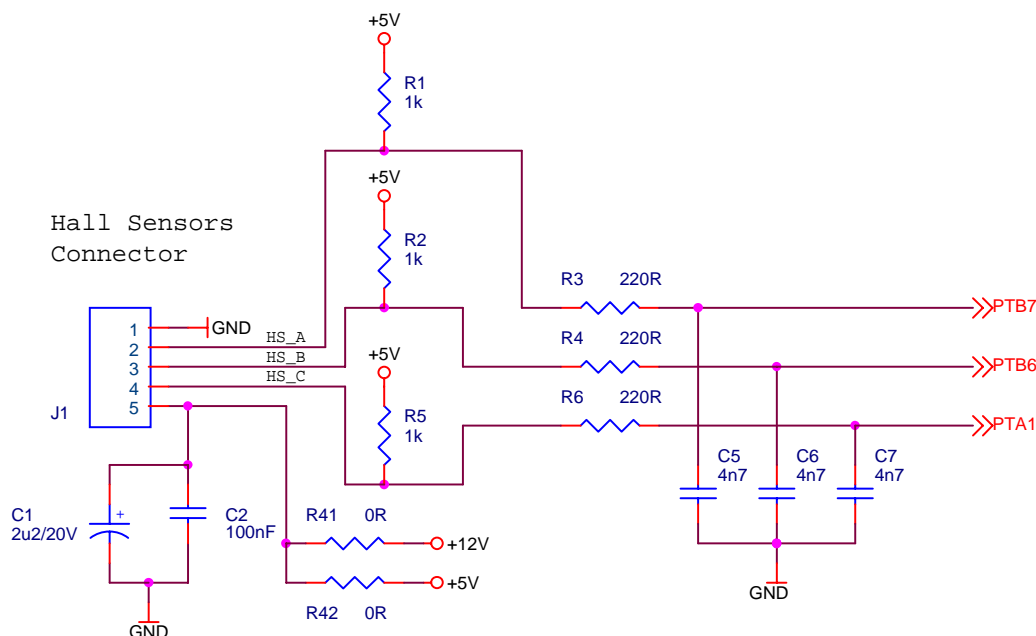


図 5-4. ホール・センサ・インタフェース

5.2.3 ユーザ・インタフェースとブートローダ

ユーザ・インタフェースはドライブの制御を可能にします。「[図 5-5. ユーザ・インタフェース](#)」にユーザ・インタフェースを示します。速度は、ジャンパ経由で ADC の AD2 に接続されたポテンショメータによって設定できます。小型セラミック・コンデン

サ C16 が信号のフィルタリング用に挿入されています。ラン / ストップ・スイッチもジャンパ経由で PTA3 に接続されています。ジャンパを使用すれば、外部ユーザ・インタフェースを PTA3 と PTA4/AD2 に接続できます。これらの MCU ピンに印加できる電圧は、 $+5V_{DC}$ ですので注意してください。

ピン PTA4 は、フラッシュ・ブートローダによるフラッシュのプログラミングで使用されます。リセット後、ブートローダは選択されたピン (PTA3) によって通信を試みます。プログラマからの応答があれば、このピンによるフラッシュのプログラミングが可能です。応答がなければ、所定のタイミングを取ってからユーザのプログラムが実行されます。シリアル・ブートローダを使用する際は、セラミック・コンデンサ C16 を取り外す必要があります。

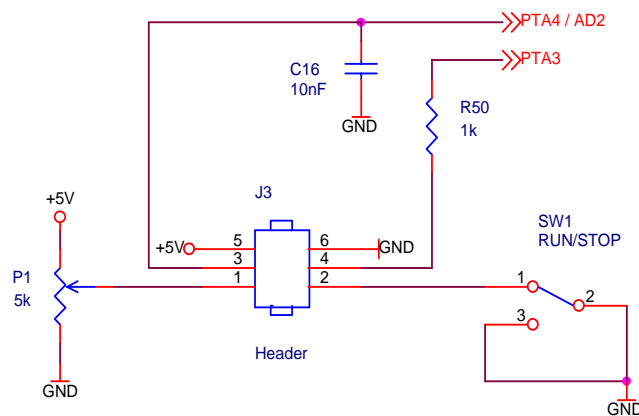


図 5-5. ユーザ・インタフェース

5.2.4 DC バス電圧検出と電源ライン入力

電源端子には供給電源を接続します。回路図を「[図 8-2. パワー・ステージ](#)」に示します。ショート防止用にヒューズ F1 があります。入力コンデンサ C17 とチョーク L1 は、電源のフィルタリング処理を行います。このチョークの定格は 8A です。ユニポーラ過渡電圧サプレッサ D5 は、60V を越える電源の電圧ピークを抑制します。

マイクロコントローラのために、DC バス電圧に比例するフィードバック信号が使用されます。DC バス電圧は、R11 と R12 から成る電圧デバイダによってスケールダウンされます。DC バス電圧は 65V 以下であり、出力 V_{DCBUS} の電圧は 5V となるように調整されます。

5.2.5 3 相 H ブリッジ

出力ステージは、IGBT 出力トランジスタを含む 3 相 H ブリッジです。出力ステージは、高電圧 3 相ゲート・ドライバによって大幅に簡素化されています。このゲート・ドライ

パは、過電流検出とフォルト生成を行うサイクル単位の電流制限機構を備えています。「[図 5-6.3 相 H ブリッジ \(A 相\)](#)」は 1 つの相のみを示す回路図です。

ゲート・ドライバは、International Rectifier 社の IR2132 です。これは、高電圧・高速度 MOSFET/IGBT ドライバであり、上側と下側が独立に構成された基準出力チャネルを特長としています。また、低電圧ロックアウトと過電流保護機能も備わっています。

モータ・ドライブの設計においては、出力トランジスタに合ったゲート・ドライブのインピーダンスの選択が重要な課題の 1 つです。「[図 5-6.3 相 H ブリッジ \(A 相\)](#)」では、抵抗 R16、抵抗 R30、ダイオード D8、そして IR2132 の電流ソース / シンク機能によって、下側のハーフ・ブリッジ・トランジスタに合ったゲート・ドライブのインピーダンスが決まります。上側のハーフ・ブリッジでも同様のネットワーク構成となっています。2 つのネットワークによって、ターンオン・ゲート・ドライブのインピーダンスは約 24 Ω に、ターンオフ・ゲートのインピーダンスは約 4 Ω にそれぞれ設定されます。これらの設定値によって、遷移時間は約 200 nsec となります。

MOSFET のゲートは、ゲート信号に危険なピーク電圧を避けるために 18V ツェナー・ダイオード D18 および D21 によって保護されています。放電抵抗 R44 および R47 は並列接続です。

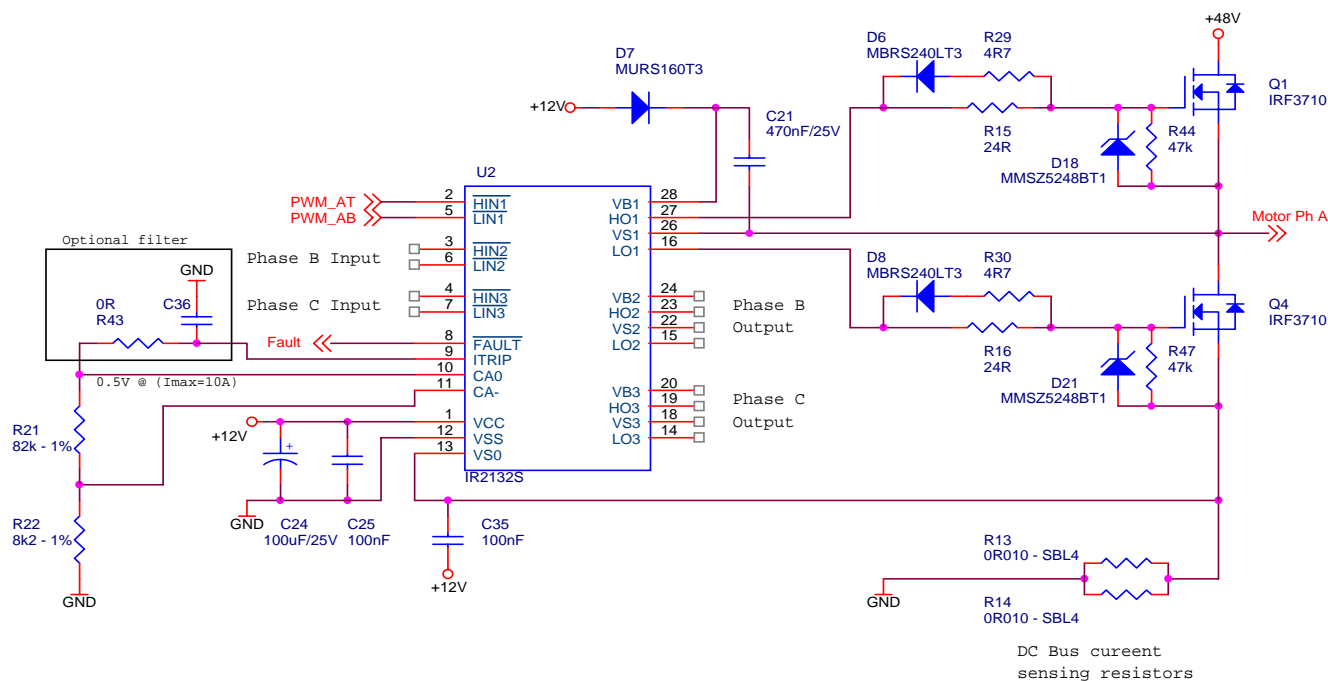


図 5-6.3 相 H ブリッジ (A 相)

5.2.6 電流の検出

既に述べたように、3相ドライバ IR2132 は、過電流検出とフォルト生成を行うサイクル単位の電流制限機構を備えています。オンチップ型グラウンド・リファレンス・オペアンプによって、外部の電流検出抵抗を経由してブリッジ電流のアナログ・フィードバックが行われます。6本の出力を終端するこの抵抗によって電流トリップ機能を実現されます。オープン・ドレイン/フォルト信号は、シャットダウンが過電流または低電圧のいずれによって発生したかを示します。

「**図 5-7. 電流の検出 (詳細)**」は、「**図 5-6.3 相 H ブリッジ (A 相)**」に基づく回路の詳細な接続形態を示しています。IR2132 内にはオペアンプとコンパレータがあるので、外部に必要な抵抗は R21 と R22 のみです。R21 と R22 は、オンチップ型オペアンプのゲインを決定します。このゲインは -10 に設定されています。過電流トリップは内部で 0.5V に設定されます。これは、DC バスの検出抵抗 0.005 の 10A とゲイン -10 に対応しています。

オペアンプ出力側にあるオプションのフィルタ (C36/R43) はノイズ除去用です。このオプションを選択しない場合は、0 抵抗 R43 を挿入します。

過電流の発生時には、6本のゲート・ドライブ出力すべてがディセーブルとなり、フォルト信号が生成されます。この信号はオープン・コレクタ出力であるので、MC68HC908QY4 の内部プルアップが使用されます。

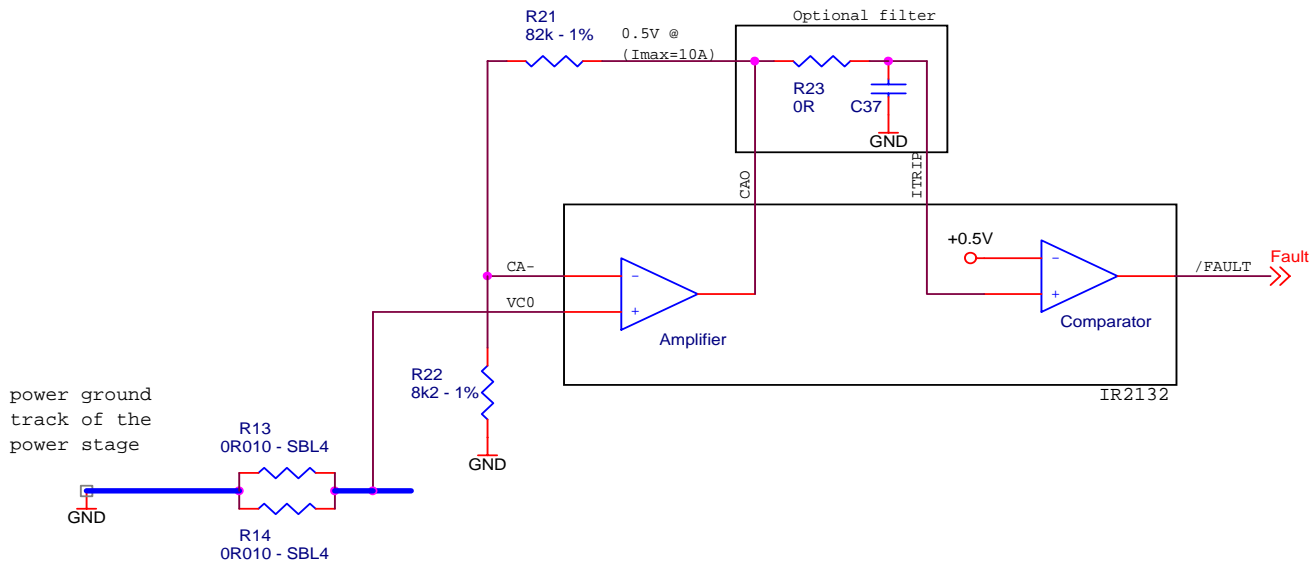


図 5-7. 電流の検出 (詳細)

5.2.7 電源

ボード搭載の電源は、 $+5V_{DC}$ および $+12V_{DC}$ の補助電圧を供給します。接続形態を「[図 8-3. 電源](#)」に示します。入力電圧 ($+36V_{DC} \sim +56V_{DC}$) は、スイッチ・モード DC-DC コンバータ LT1676 によって $+12V_{DC}$ まで下げられます。このコンバータは、 $+60V_{DC}$ までの入力電圧を受け付けます。 $+12V_{DC}$ は 3 相ゲート・ドライバで使用され、必要に応じてホール・センサでも使用されます。 $+12V_{DC}$ 電源の定格は 400 mA です。

$+12V_{DC}$ はさらに、リニア・レギュレータ MC78M05 によって $+5V_{DC}$ まで下げられます。 $+5V_{DC}$ はマイクロコントローラ、ユーザ・インタフェース、ロジックで使用され、必要に応じてホール・センサでも使用されます。

$+5V_{DC}$ 電源の定格は 400 mA です。

第6章 ソフトウェア設計

本章では、ドライブのソフトウェア設計について説明します。本章の内容は以下の通りです。

- 制御アルゴリズムのデータ・フロー
- ソフトウェアの実装
- ソフトウェア・リスト
- マイクロコントローラ・メモリとペリフェラルの使用

6.1 データ・フロー

本リファレンス・デザインのソフトウェアは、ユーザ・インタフェースとセンサから値を取得し、その値を処理し、モータ制御用の3相PWM信号を生成する必要があります。

「[図 6-1. アルゴリズムのデータ・フロー](#)」に、閉ループ BLDC モータ・ドライブの制御アルゴリズムを示します。このアルゴリズムは、以降に説明するプロセスで構成されています。

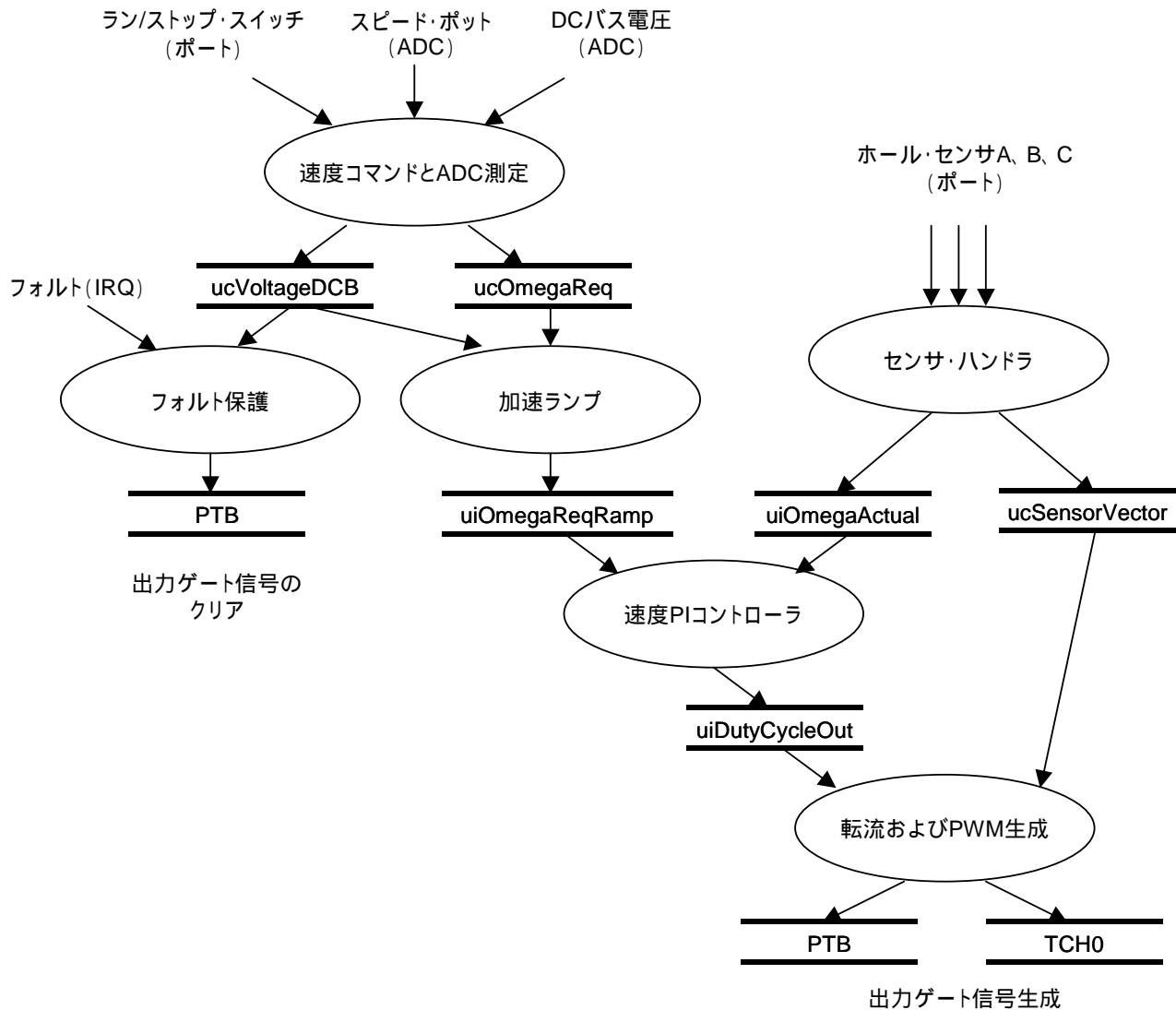


図 6-1. アルゴリズムのデータ・フロー

6.1.1 速度コマンドと ADC 測定

このプロセスの入力パラメータ（ラン/ストップ・スイッチと速度ポテンショメータ）が評価されると、その結果に応じて速度コマンド `ucOmegaReq` が計算されます。さらに、DC バス電圧 `ucVoltageDCB` が測定されます。

6.1.2 センサ・ハンドラ

ドライブの制御アルゴリズムは3相ホール位置センサを使用します。このセンサの目的は、転流ベクトルの生成と実速度の計算です。

転流ベクトルの計算では、3本のホール・センサ入力のすべてが評価されます。3ビットの転流パターン `ucSensorVector` が作成され、後に「転流およびPWM生成」のプロセスで適切な転流パターンを選択するのに使用されます。

速度の計測にはタイマのインプット・キャプチャ機能を用いています。このタイマは、ホール・センサ出力の選択された相の立ち上がりエッジ間の時間を読み込み、実際のモータ速度 `uiOmegaActual` を算出します。ノイズ耐性向上のために、速度計測用のソフトウェア・フィルタをプロセスに組み込むこともできます。その場合、実際のモータ速度は複数の測定結果を平均した値として算出されます。

6.1.3 加速ランプ

このプロセスでは、加速ランプに従って、必要な速度 `ucOmegaReq` に基づいた新しい速度コマンド `uiOmegaReqRamp` を計算します。

モータは減速時に発電機として働くことができます。発電機の状態ではDCバス・コンデンサが充電され、その電圧は最大電圧を容易に超えてしまうことがあります。そのため、DCバス電圧を測定して制限値と比較します。減速時に過電圧が発生した場合、減速は中断され、モータは一定の速度で回転してDCバス・コンデンサを放電します。その後、減速が再開可能となります。

6.1.4 速度コントローラ

閉速度ループ制御の場合は、実際のモータ速度を測定するのが特徴です。測定値の情報は、基準の設定ポイントと比較され、エラー信号が生成されます。エラー信号の大きさと極性は、実際の速度と目的の速度の相違に対応します。

速度PIコントローラは、エラー補正のために出力デューティ・サイクルを修正します。「[図 6-2. 閉ループ速度制御](#)」に電圧制御ループの一般的な原理を示します。

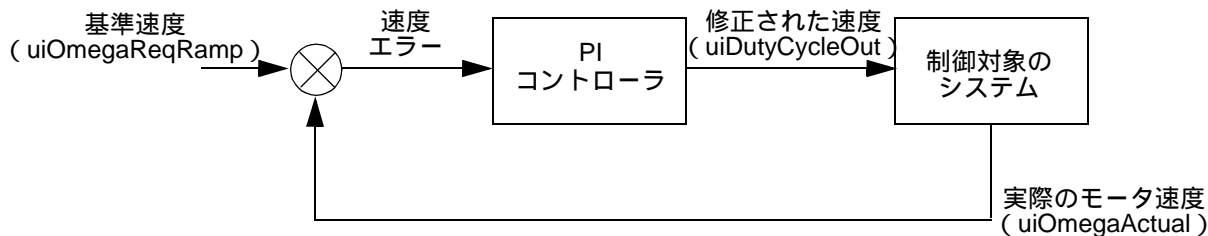


図 6-2. 閉ループ速度制御

6.1.5 転流および PWM 生成

転流プロセスでは 6 本のゲート信号出力で適切な転流パターンを生成し、PWM 生成プロセスでは選択されたゲート出力の PWM 信号を生成します。転流パターンは、3 ビット転流ベクトル `ucSensorVector` によって転流テーブルから選択されます。このパターンは、マイクロコントローラのポート B の選択された出力にロードされます。PWM は、必要な出力デューティ・サイクル `uiDutyCycleOut` に従って、オンチップ・タイマのアウトプット・コンペア (OC) 機能によって生成されます。PWM はマイクロコントローラのタイマ出力となります。その後、3 相ゲート・ドライバに与える PWM がボード搭載のロジックによって選択されます。

6.1.6 フォルト保護

このプロセスではフォルト処理を行います。ソフトウェアは、DC バス過電流信号と DC バス電圧測定値という 2 つのフォルト入力を取り込みます。

DC バス過電流は、ボード搭載のハードウェア回路で検出されます。過電流の場合、外部のハードウェアがマイクロコントローラの `/IRQ` 入力で立ち下がりエッジを発生させます。この信号は、優先順位が最も高いノンマスク割込みを起こします。この割込みサービス・ルーチンは、すべての PWM ゲート信号を非アクティブ・セーフ状態にし、システムのフォルト状態を設定します。

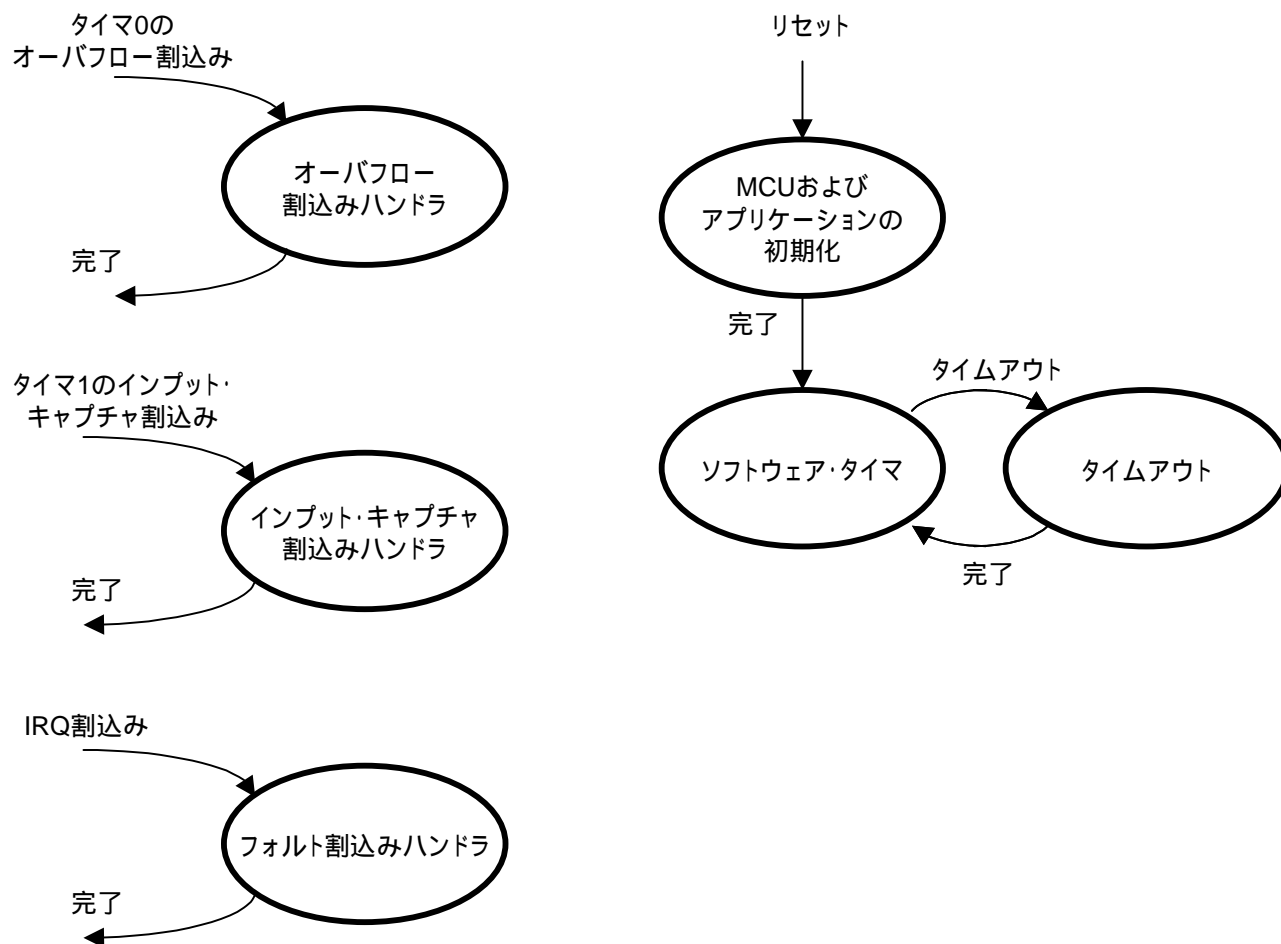
DC バス電圧は、ソフトウェアによる低電圧保護と過電圧保護のために検出されます。検出された DC バス電圧は、ソフトウェア内で設定された制限値と比較されます。フォルト発生時、割込みサービス・ルーチンは、すべての PWM ゲート信号を非アクティブ・セーフ状態にし、ドライブのフォルト状態を設定します。

フォルト発生時、割込みサービス・ルーチンはドライブを動作禁止のセーフ・フォルト状態に設定します。この状態は、ラン/ストップ・スイッチをストップ位置にすることでクリアされます。

6.2 ソフトウェアの実装

「**図 6-3. ソフトウェアの実装 (概要)**」で、ソフトウェアの実装について概要を述べています。ここでは、リセットと3つの割り込み状態の各々から起動されるメイン・ルーチンを示します。メイン・ルーチンは、マイクロコントローラとアプリケーションの初期化機能のみならず、制御アルゴリズムの時間基準を設定するソフトウェア・タイマも含まれています。割り込み状態で実行されるのは、実際のモータ速度の計算やフォルト・ハンドラ、さらには転流ベクタの決定とPWM生成プロセスです。

図 6-3. ソフトウェアの実装 (概要)



6.2.1 初期化

メイン・ルーチンではマイクロコントローラの初期化を行います。

- MCU コアの初期化
 - IRQ 割込みと IRQ プルアップのイネーブル
- COP と LVI のイネーブル (CONFIG レジスタ)
- キーボード割込みのディセーブル
- I/O ポートのセットアップ
- アウトプット・コンペア (OC) 用タイマ 0 の初期化
- インプット・キャプチャ (IC) 用タイマ 1 の初期化
- アナログ - デジタル・コンバータの初期化

MCU には、タイマ・チャンネルが 2 本と、16 ビット・タイマ・カウンタが 1 つしかありません。このカウンタは、主に必要な周期を持つ PWM 信号を生成することに使用されます。デューティ・サイクルは、アウトプット・コンペアに設定されたタイマ・チャンネル 0 によって指定されます。チャンネル 1 は、インプット・キャプチャ機能による速度測定で使用されます。この測定では、ホール・センサ信号のエッジ間の時間を計測します。

MCU の初期化後、変数が初期化され、割込みが可能となります。

6.2.2 割込み

割込みハンドラの役割は以下の通りです。

- オーバフロー割込みハンドラは、PWM デューティ・サイクルの更新と、ホール・センサ信号に基づき転流ベクトルを決定する際に使用されます (転流および PWM 生成のプロセス)。
- インプット・キャプチャ (IC) 割込みハンドラは、2 つの IC エッジ間の時間を読み込みます (速度センサのプロセスにおける基本的な部分)。MCU に 1 つしかないタイマは PWM の生成で使われるので、ホール・センサ・エッジ間の時間は PWM 周期のカウント値によって決まります。
- フォルト割込みハンドラは、過電流フォルトの割込みを処理します (フォルト制御のプロセスにおける過電流部分)。

6.2.3 ソフトウェア・タイマ

ソフトウェア・タイマ・ルーチンは、バックグラウンドで実行される必要なサブルーチンに対してタイミング・シーケンスを与えます。バックグラウンドのルーチンは、10 msec のタイミングを取って呼び出されます。このタイミングは、PWM 周期のカウント値に基づいています。

バックグラウンド・ルーチンの役割は以下の通りです。

- DC バス電圧とスピード・ポットの測定のためのアナログ - デジタル変換処理

- アプリケーション・ステート・マシン（ストップ、充電、ラン、フォルト）に基づく、必要な速度の決定
- DC バス過電圧保護付き速度ランプに基づく、減速時の速度コマンドの計算
- 速度 PI コントローラによる必要なデューティ・サイクルの計算

6.3 ソフトウェアのカスタマイズ

正しい転流テーブルの定義は、ソフトウェアのカスタマイズで重要なポイントとなります。このプロセスの目的は、検出されたホールセンサ・パターンに従って MCU ポートで生成される転流パターンを決定することです。決定のステップは以下の通りです。

1. 各転流セクタごとにホール・センサ・パターンを決定する。
2. 各ホール・センサ・パターンごとに転流ベクトルを決定する。
3. ソフトウェア・コードに従って転流テーブルを決定する。

6.3.1 ホール・センサ・パターンの決定

最初に、BLDC モータ・セクタに対応するホール・センサ・パターンを決定します。そのためには、正と負の電圧の組合せを 3 つの相すべてに供給し、モータを所定のセクタまで移動させ、モータが停止した時点でホール・センサ信号を調べます。表 6-1. に、各セクタごとに必要な相を示し、併せて BLDC モータのセンサ出力の例も示します。セクタ I ~ VI は、「[図 6-4. セクタと固定子磁束ベクトル](#)」のセクタに相当します。

表 6-1. ホール・センサ・パターンの決定

セクタ	供給される相			モータのセンサ出力		
	A 相	B 相	C 相	ホール A	ホール B	ホール C
I	-U	-U	+U	1	0	1
II	-U	+U	+U	0	0	1
III	-U	+U	-U	0	1	1
IV	+U	+U	-U	0	1	0
V	+U	-U	-U	1	1	0
VI	+U	-U	+U	1	0	0

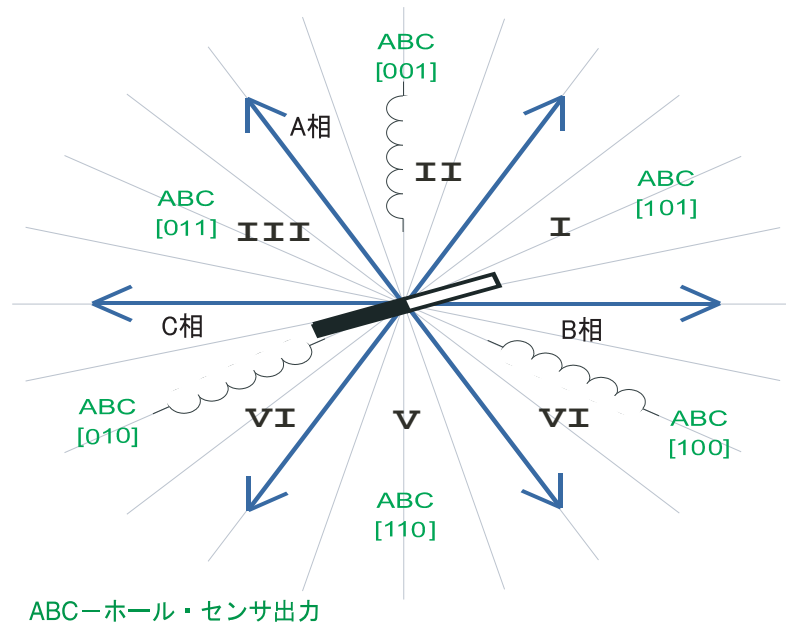


図 6-4. セクタと固定子磁束ベクトル

6.3.2 転流ベクトルの決定

ホール・センサ・パターンを決定した後、対応する転流ベクトルを決定します。I ~ VI の各セクタにつき、対応する転流ベクトル A ~ F とホール・センサ・パターンを決定します。

「表 6-2. 反時計回りの転流ベクトルの決定」では、実際の角度を $60^\circ \sim 120^\circ$ に変化させる反時計回りのベクトルを示します（「3.4 転流」参照）。2進数のホール・センサ・パターンは、1 ~ 6 の 10進数に変換されます（例えば、2進数の 101 は 10進数の 5 となります）。「表 6-2. 反時計回りの転流ベクトルの決定」を見ると、転流ベクトル A はホール・センサ・パターン 5、転流ベクトル B はホール・センサ・パターン 1、・・・という対応関係が分かります。

表 6-2. 反時計回りの転流ベクトルの決定

セクタ	転流ベクトル			ベクトル	決定された ホール・センサ・パターン			変換後の HS パターン
	A 相	B 相	C 相		HS A	HS B	HS C	
I	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	NC	A	1	0	1	5
II	NC	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	B	0	0	1	1
III	$+V_{DCB}$	NC	$-V_{DCB}$	C	0	1	1	3
IV	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	NC	D	0	1	0	2
V	NC	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	E	1	1	0	6
VI	$-V_{DCB}$	NC	$+V_{DCB}$	F	1	0	0	4

時計回りの場合、転流ベクトルは「表 6-3. 時計回りの転流ベクトルの決定」により決定できます。

表 6-3. 時計回りの転流ベクトルの決定

セクタ	転流ベクトル			ベクトル	決定された ホール・センサ・パターン			変換後の HS パターン
	A 相	B 相	C 相		HS A	HS B	HS C	
I	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	NC	D	1	0	1	5
II	$+V_{DCB}$	NC	$-V_{DCB}$	C	1	0	0	4
III	NC	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	B	1	1	0	6
IV	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	NC	A	0	1	0	2
V	$-V_{DCB}$	NC	$+V_{DCB}$	F	0	1	1	3
VI	NC	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	E	0	0	1	1

6.3.3 転流テーブルの決定

アプリケーション・ソフトウェアでは、転流ベクトルは 8 個の値（エントリ 0 ~ 7）から成るテーブルにより決定します。ホール・センサ・パターンは、転流ベクトルのテーブルを指すポイントとなります。本章の例については、「表 6-4. 転流テーブル」に示す転流テーブルが適用されます。ホール・センサ・パターン 0[000] および 7[111] は、フォルトを表す組合せであり、正常な動作ではありえないものです。この状態は、ホール・セン

サ・インタフェースの切断や誤動作などによって生じます。その場合、ドライブを保護するために、出力チャンネルがオフ（出力信号はセーフ状態）になります。

表 6-4. 転流テーブル

変換後の HS パターン	転流ベクトル反時計回り	転流ベクトル時計回り
0	OFF	OFF
1	B	E
2	D	A
3	C	F
4	F	C
5	A	D
6	E	B
7	OFF	OFF

上記の転流テーブルによる反時計回りのソフトウェア・コードを以下に示します。

```
const unsigned char BLDC_COMMUTATION_TABLE_CCW[8] =
{
TURN_OFF          ,          /* turn-off */
VECTOR_B          ,
VECTOR_D          ,
VECTOR_C          ,
VECTOR_F          ,
VECTOR_A          ,
VECTOR_E          ,
TURN_OFF          /* turn-off */
};
```

ここで：

```
#define TURN_OFF          0x00
#define VECTOR_A          0x06
#define VECTOR_B          0x24
#define VECTOR_C          0x21
#define VECTOR_D          0x09
#define VECTOR_E          0x18
#define VECTOR_F          0x12
```

その後、以下のコマンドを使って出力ベクトルがポートで生成されます。

```
PTB = BLDC_COMMUTATION_TABLE_CCW[ucSensorVector];
```

ucSensorVctor は、ホール・センサの実際の状態に基づくホール・センサ・パターンです。

6.4 ソフトウェア・リスト

本リファレンス・デザインに関連するソフトウェア・リストが入手可能です。コードのモジュール性には特に注意が払われています。コードはC言語で書かれています (MC68HC08 マイクロコントローラ用 Metrowerks 社の CodeWarrior)。

ソフトウェアは、アプリケーション・ソース・コード BLDCwithHS_908QY4.c とアプリケーション・ヘッダ・ファイル BLDCwithHS_908QY4.h で構成されています。その内容は以下の通りです。

- main() - リセット後のエン트리・ポイント。初期化ルーチンの呼び出し、ソフトウェア・タイマ
- MCUInit() - MCU の初期化
- ApplicationInit() - アプリケーションの初期化
- VariablesInit() - 変数の初期化
- StartUpVariablesInit() - モータの起動に必要な変数の初期化
- FaultISR() - DC バス過電流ハードウェア・フォルト検出用の ISR
- OverFlowISR() - PWM デューティ・サイクルの更新と、ホール・センサに基づく転流ベクトルの決定と生成
- ScanAdc() - スピード・ポットと DC バス電圧のスキャン
- GetReqSpeed() - 必要な速度の計算
- SpeedRamp() - 速度ランプと減速時における DC バス過電圧保護
- GetDutyCycle() - PWM 出力デューティ・サイクル計算と速度 PI コントローラ

6.5 マイクロコントローラのメモリとペリフェラルの使用

「表 6-5. メモリの使用」では、MC68HC908QY4 マイクロコントローラを用いた 3 相 BLDC モータ・ドライブを動作させるのに必要なメモリを示します。マイクロコントローラ・メモリには、この動作以外のタスクで利用可能なスペースがまだかなり確保されています。

表 6-5. メモリの使用

メモリ	利用可能なスペース (MC68HC90QY4)	使用される スペース
FLASH	4096 バイト	1650 バイト
RAM	128 バイト	110 バイト (80 バイトのスタックを含む)

MC68HC908QY4 マイクロコントローラは、モータ・ドライブの設計を簡素化する多くの特長を備えています。「表 6-6. MC68HC908QY4 モジュールの使い方」では、利用可能な各ブロックを示すと共に、本システムにおけるブロックの使用について説明します。

表 6-6. MC68HC908QY4 モジュールの使い方

MC68HC908QY2/4 で利用可能なモジュール	使用の有無	目的
タイマ (2 チャンネル)	有り	PWM 生成 (TCH0) 実際のモータ速度を測定するための インプット・キャプチャ (TCH1)
キーボード・インタフェース	無し	
I/O ポート	有り	ユーザ・インタフェース、ゲート信号 生成
クロック生成	有り	オンチップ・クロック生成
COP	有り	ソフトウェア・ランナウェイ保護
IRQ	有り	フォルト保護
LVI	有り	低電圧保護
ADC	有り	速度設定 DC バス電圧測定
POR	有り	電源投入後のリセット

デザイナ・リファレンス・マニュアル — DRM046

第7章 参考資料

- MC68HC908QY4 Data Sheets
MC68HC908QY4, Rev.3.0, Freescale10/2003
- Application Note “Developer’s Serial Bootloader for M68HC08”
AN2295 Rev.5, Freescale 03/2004

デザイナー・リファレンス・マニュアル — DRM046

第 8 章 付録 A - 回路図と部品リスト

8.1 回路図

「[図 8-1. ホール・センサ入力とユーザ・インタフェースを備えたマイクロコントローラ](#)」
「[図 8-2. パワー・ステージ](#)」
「[図 8-3. 電源](#)」は、3 相 BLDC モータ・ドライブの回路図です。特に指定のない限り、抵抗は 1/10 ワットで $\pm 5\%$ の許容差を持ち、抵抗値の単位はオームとします。同一端子名の付いている信号は、電氣的に接続されています。

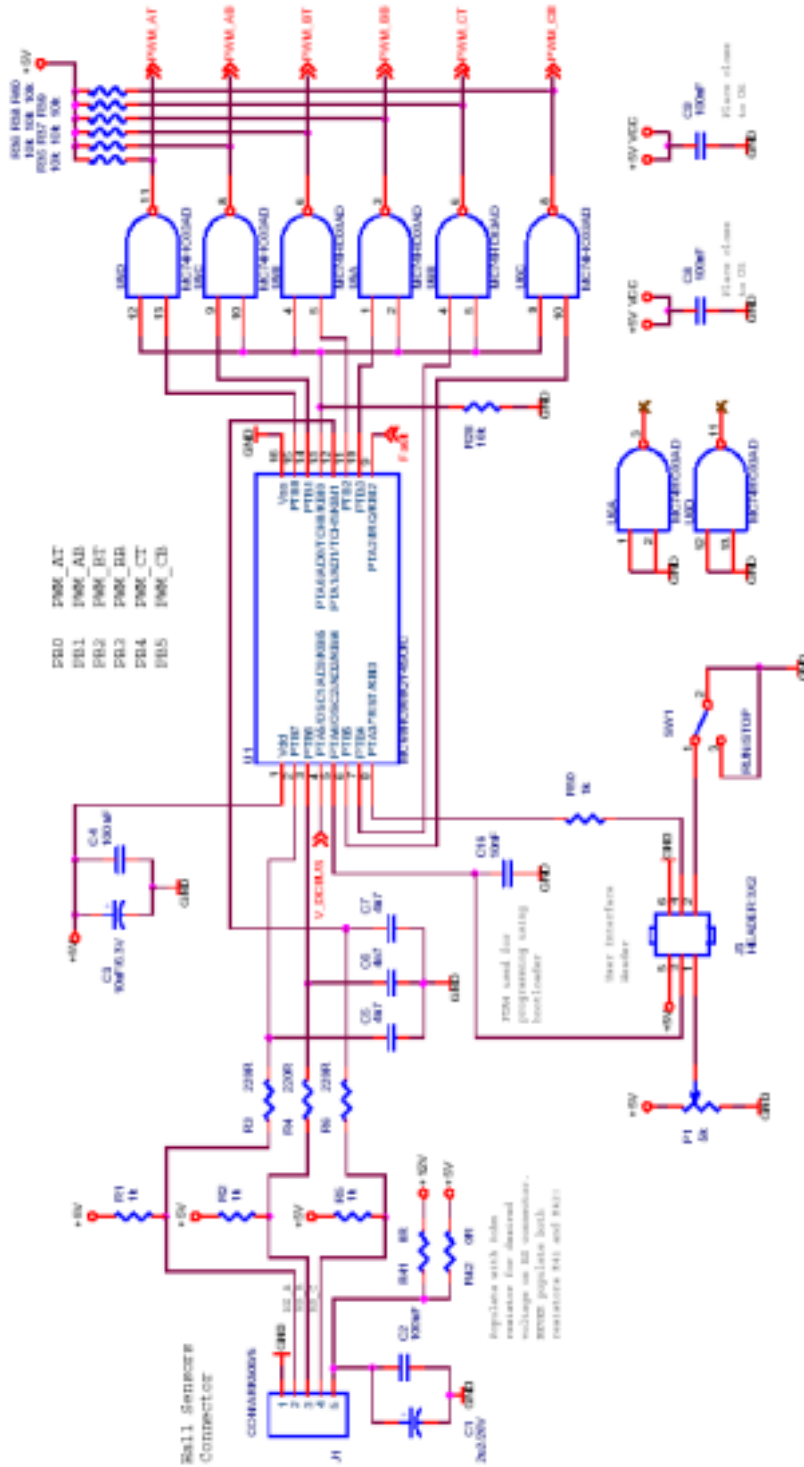


図 8-1. ホール・センサ入力とユーザ・インタフェースを備えたマイクロコントローラ

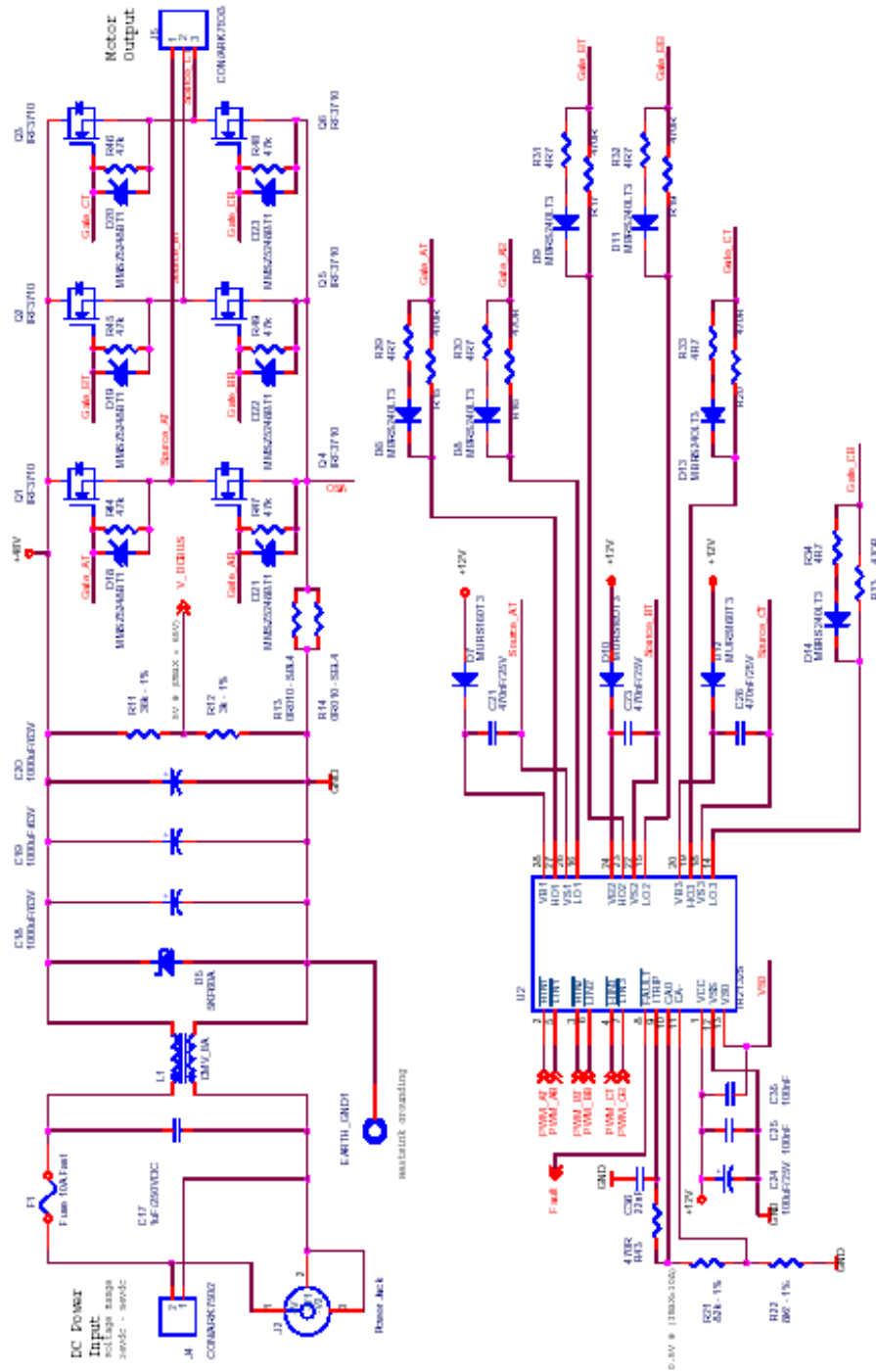


図 8-2. パワー・ステージ

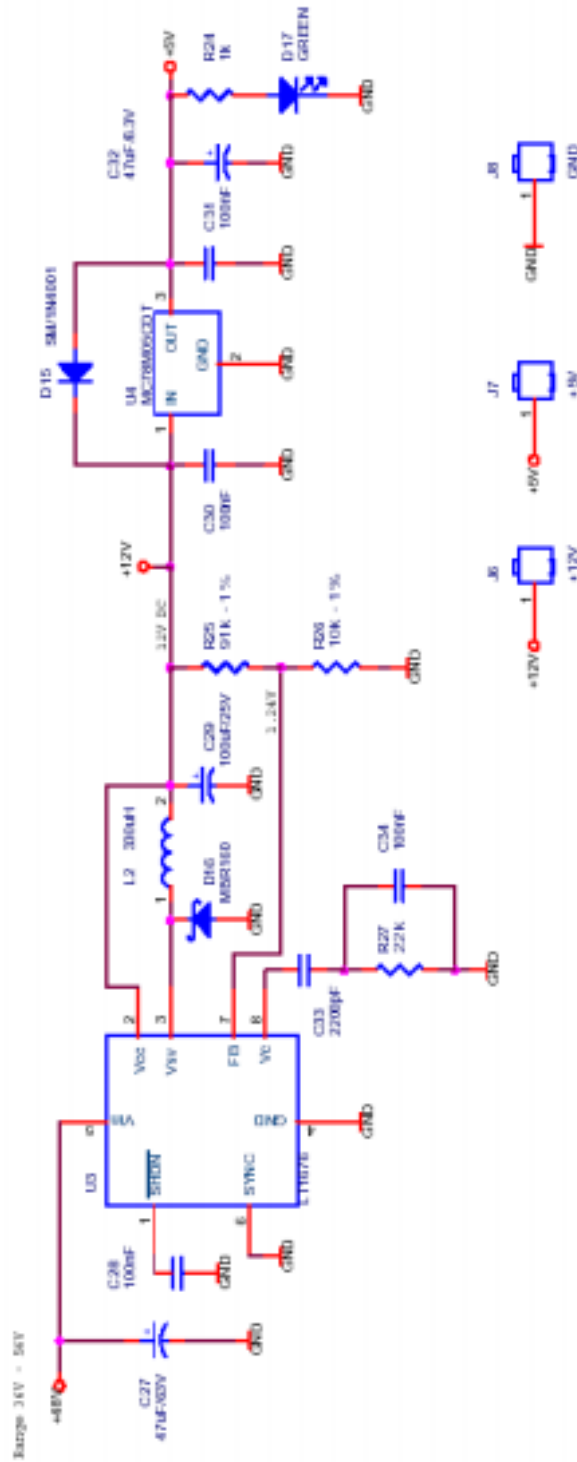


図 8-3. 電源

8.2 部品リスト

「表 8-1. 部品リスト」に 3 相 BLDC モータ・ドライブの各部品を示します。

表 8-1. 部品リスト

Item	Designators	Qty	Description	Manufacturer	Part Number
1	C1	1	2200nF / 20Vdc tantalum size A	Any acceptable	
2	C2,C4,C8,C9, C25,C28,C30, C31,C34, C35	9	100nF ceramic 0805	Any acceptable	
3	C3	1	10 μ F / 6.3V tantalum size A	Any acceptable	
4	C5,C6,C7	3	4700pF ceramic 0805	Any acceptable	
5	C16	1	10nF ceramic 0805	Any acceptable	
6	C17	1	metallized polyester capacitor 1.0 μ F / 250VDC	Wima	MKS 4 0.1/20/250
7	C18,C19,C20	3	1000 μ F/63V electrolytic capacitor	Panasonic	ECA1JM102
8	C21,C23,C26	3	470nF/25V ceramic 1206	Any acceptable	
9	C24, C29	1	100 μ F/25V electrolytic	ELNA	RVK25V101M
10	C27	1	47 μ F/63V electrolytic	Panasonic	ECA1JM470
11	C32	1	47 μ F / 6.3V tantalum size D	Any acceptable	
12	C33	1	2200pF ceramic 0805	Any acceptable	
13	D5	1	transient voltage suppressor 60V/5000W	Fagor, General Semiconductor	5KP60A
14	D6,D8,D9, D11,D13,D14	6	2A 40V low Vf Schottky rectifier	On Semiconductor	MBRS240LT3
15	D7,D10,D12	3	1A 600V ultrafast rectifier	On Semiconductor	MURS160T3
16	D15	1	standard recovery diode SMD	On Semiconductor	1N4001
17	D16	1	Schottky diode 1A / 60V	On Semiconductor	MBR160
18	D17	1	green LED SMD	Kingbright	KP-2012MGC
19	D18,D19,D20, D21,D22,D23	6	Zener diode 18V / 0.5W	On Semiconductor	MMSZ5248BT1
20	F1	1	fuse holder (with fuse 10A fast)	MULTICOMP	MCHTE15M
21	J1	1	5-pin PCB terminal block	Weidmuller	LP 5.08/5/90

表 8-1. 部品リスト (続き)

Item	Designators	Qty	Description	Manufacturer	Part Number
22	J2	1	PCB mounting low voltage DC power socket	Switchcraft	RAPC722
23	J3	1	jumper 2x3 x.1oc	Berg Electronics	67997-206H
24	J4	1	2-pin PCB terminal block	Weidmuller	LP 7.62/2/90
25	J5	1	3-pin PCB terminal block	Weidmuller	LP 7.62/3/90
26	J6, J7, J8	1	test point	-	
27	L1	1	open former common mode suppression choke 8A/0.74mH	Roxburgh	CMV80
28	L2	1	330 μ H inductance	TOKO	822LY-331K
29	P1	1	5k Ω potentiometer 1/2W	Clarostat Sensors and Controls, Inc.	392-JB-502
30	Q1,Q2,Q3, Q4,Q5,Q6	6	HEXFET® Power MOSFET 100V / 57A	International Rectifier	IRF3710
31	R1,R2,R5, R24,R50	5	1k Ω resistor 1/10W 5% 0805	Any acceptable	
32	R3,R4,R6	3	220 Ω resistor 1/10W 0805	Any acceptable	
33	R11	1	36k Ω resistor 1/10W 1% 0805	Any acceptable	
34	R12	1	3k Ω resistor 1/10W 1% 0805	Any acceptable	
35	R14,R13	2	0.010 Ω resistor 4Watt	Meggitt Polymers & Composites	SBL4 0R010
36	R15,R16,R17, R19,R20,R23	6	24 resistor 1/10W 5% 0805	Any acceptable	
37	R21	1	82k Ω resistor 1/10W 1% 0805	Any acceptable	
38	R22	1	8200 Ω resistor 1/10W 1% 0805	Any acceptable	
39	R25	1	91k Ω resistor 1/10W 1% 0805	Any acceptable	
40	R26	1	10k Ω resistor 1/10W 1% 0805	Any acceptable	
41	R27	1	22k Ω resistor 1/10W 5% 0805	Any acceptable	
42	R28,R35,R36, R37,R38,R39, R40	7	10k Ω resistor 1/10W 5% 0805	Any acceptable	
43	R29,R30,R31, R32,R33,R34	6	4.7 Ω resistor 1/10W 5% 0805	Any acceptable	

表 8-1. 部品リスト (続き)

Item	Designators	Qty	Description	Manufacturer	Part Number
44	R41, R42	1	0Ω resistor 0805 Note: Populate either R41 or R42 according to the desired voltage on J1 pin 5. Never populate both R41 and R42	Any acceptable	
	R43	1	0Ω resistor 0805	Any acceptable	
45	R44,R45,R46, R47,R48,R49	6	47kΩ resistor 1/10W 5% 0805	Any acceptable	
46	SW1	1	PCB mount vertical switch	Alcoswitch / Thomas&Betts	TT11DGPC-1FN
47	U1	1	microcontroller	Motorola	MC68HC908QY4SO IC
48	U2	1	3-phase bridge driver	International Rectifier	IR2132S
49	U3	1	step-down switching regulator, 7.4-60Vdc input	Linear Technology	LT1676
50	U4	1	linear regulator 5V / 1/2W	On Semiconductor	MC78M05CDT
51	U5, U6	2	quad NAND with open collector	On Semiconductor	MC74HC03AD
52	Install on J3: pins1-3 and pins2-4	2	shunt	Specialty Electronics	2JM-G
53	no designator	1	heatsink	Fisher Elektronik	SK 481 85
54	no designator	6	retaining springs for transistors	Fisher Elektronik	THFU1
55	no designator	6	isolation pads for TO220	Any acceptable	
56	no designator	4	screw M3 / 8mm	Any acceptable	
57	no designator	1	pot knob	Radiatron	021-2220 type 71-10-1/8-Black
58	no designator	5	Stick-on rubber feet	Fastex	5033-01-00-5001

第 9 章 付録 B - システムのセットアップ

9.1 目次

9.2	ハードウェア・セットアップ	63
9.3	コントローラ・ボードのジャンパ設定	64
9.4	必要なソフトウェア・ツール	66
9.5	アプリケーションの作成とアップロード	66
9.6	アプリケーションの実行	66

9.2 ハードウェア・セットアップ

「[図 9-1. BLDC モータを含むシステムのセットアップ](#)」に、システムのハードウェア構成を示します。この構成は以下のモジュールから成ります。

- 3相 BLDC モータ・ドライブ
- ホール・センサ付き 3相 BLDC モータ
- 48V 電源

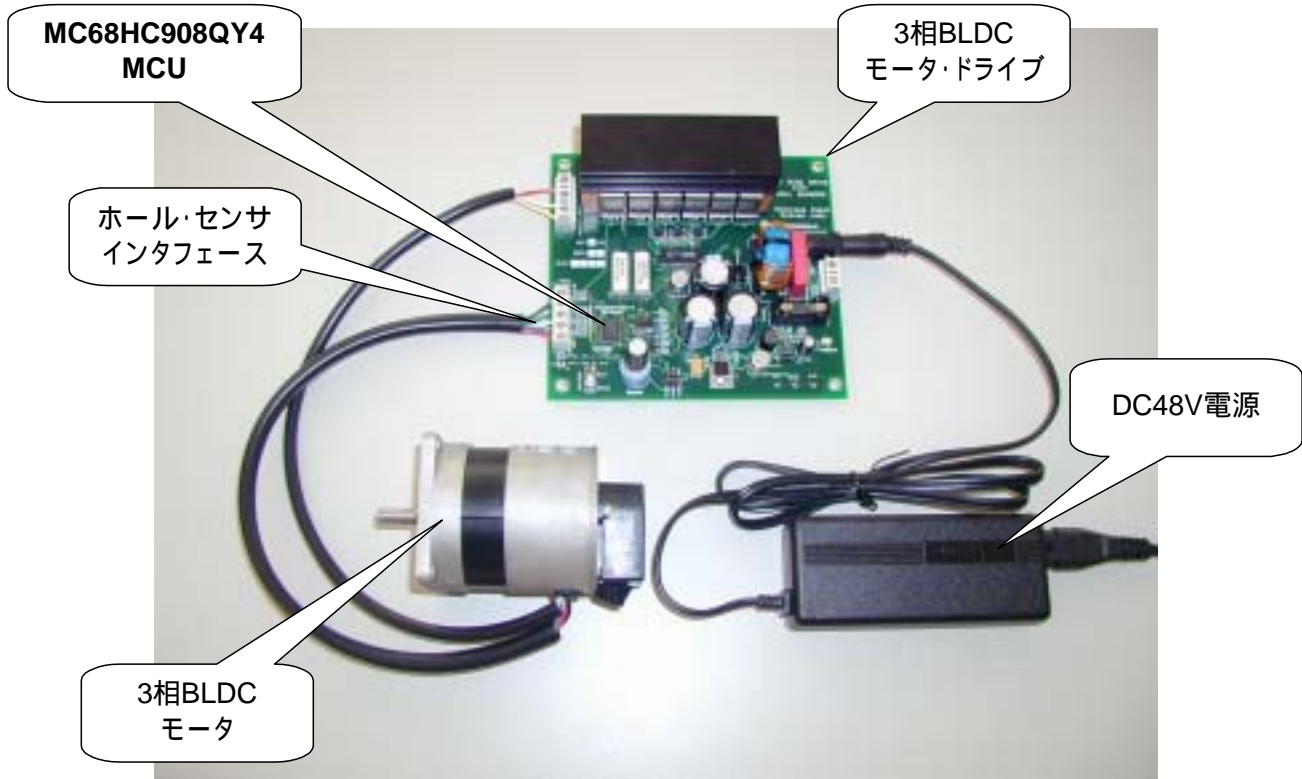


図 9-1. BLDC モータを含むシステムのセットアップ

9.3 コントローラ・ボードのジャンパ設定

「[図 9-2. BLDC モータ・ドライブ・ボードのジャンパ設定](#)」と「[表 9-1. BLDC モータ・ドライブ・ボードのジャンパ設定](#)」に 3 相 BLDC モータ・ドライブ基板のジャンパ設定を示します。これらの設定は、ボード搭載のユーザ・インタフェースで制御される 3 相 BLDC モータ制御アプリケーションを実行する場合に必要となります。

ジャンパ J3 によって、外部ユーザ・インタフェースを選択できるほか、ブートローダによるマイクロコントローラ・フラッシュのプログラミングも行えます。

ゼロ 抵抗 R41 および R42 を使用すると、以下のようにホール・センサ・コネクタ J1 ピン 5 のホール・センサ用電圧レベルを選択できます。

- R41 をゼロ に設定すると、J5/1 の電圧レベルは +12V_{DC} となります。
- R42 をゼロ に設定すると、J5/1 の電圧レベルは +5V_{DC} となります。

警告： 必要な電圧に応じて 1 つの抵抗のみゼロ に設定し、もう 1 つの抵抗は切断すること。両方の抵抗をゼロ に設定すると、ショートによってボードが破壊される恐れがあります。

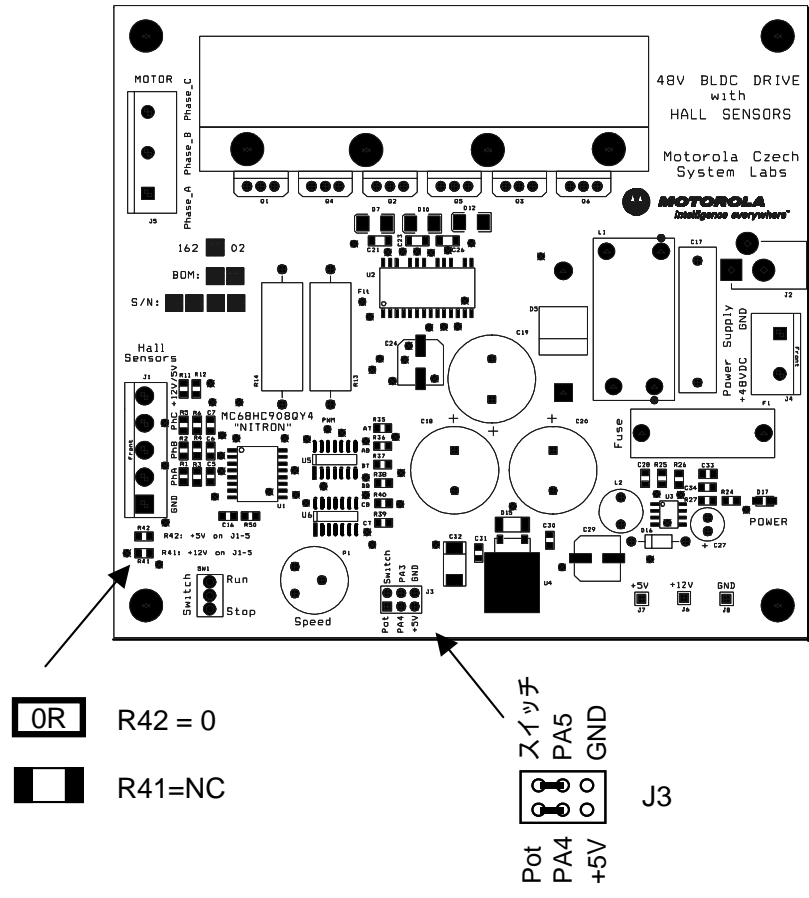


図 9-2. BLDC モータ・ドライブ・ボードのジャンパ設定

表 9-1. BLDC モータ・ドライブ・ボードのジャンパ設定

ジャンパ	説明	接続
J3	ラン/ストップ・スイッチの選択	スイッチ - PA5
J3	スピード・ポットの選択	ポット - PA4
R42	ホール・センサ・コネクタ J1 ピン 5 の電圧として +5V _{DC} の選択	ゼロ 抵抗
R41	ホール・センサ・コネクタ J1 ピン 5 の電圧として +5V _{DC} を選択しているため、+12V _{DC} は使用しない。	NC

9.4 必要なソフトウェア・ツール

本アプリケーションは、以下のソフトウェア開発ツールを必要とします。

- MC68HC08 マイクロコントローラ・バージョン 2.1 以降の Metrowerks 社 CodeWarrior
- 908QY4 のブートローダ

9.5 アプリケーションの作成とアップロード

アプリケーション・ソフトウェアは、C ソース・ファイル *BLDCwithHS_908QY4.c* とヘッダ・ファイル *BLDCwithHS_908QY4.h* の 2 つが添付されたプロジェクト・ファイル *BLDCwithHS_908QY4.mcp* として提供されます。Metrowerks 社の CodeWarrior によって、S レコード・ファイルを作成します。次に、シリアル・ブートローダまたは他のモトローラ・プログラミング・ツールによって、その実行可能ファイルを MCU にダウンロードします。

Developer's Serial Bootloader for M68HC08 は、低価格のインサーキット・プログラミング・ソリューションです。このブートローダにより、標準の通信メディア（シリアル非同期ポートなど）を用いたモトローラ製 M68HC08 フラッシュ・デバイスをインサーキットで再プログラミングできます。事前にブートローダで MCU をプログラミングしておけば、MCU メモリはインサーキットで変更できます。そのため、このブートローダはアプリケーションの開発で役立つ M68HC08 MCU ユーティリティであると言えます。ただし、このブートローダは再プログラミングでのみ使用可能であり、インサーキットのデバッグでは使用できません。このブートローダの詳細については、「AN2295/D Developer's Serial Bootloader for M68HC08」を参照してください。

MCU フラッシュ・メモリをプログラミングするには、BLDC モータ・ドライブ・ボードのピン PTA4 を使用します。このピンにブートローダ・プログラマが接続されます。その際、ジャンパを外してラン / ストップ・スイッチを無接続状態にします。

9.6 アプリケーションの実行

本アプリケーションは、電源が接続されているときに動作可能です。

システムはラン / ストップ・スイッチ (SW1) で制御します。モータ速度は速度ポテンシオメータ (P1) で設定します。正常に操作できれば、3 相 BLDC モータが回転します。

注意: 電源投入時にラン / ストップ・スイッチがラン位置に設定されている場合、このスイッチを一度ストップ位置に設定し、再びラン位置に切り替えることでモータを回転させてください。これは、モータが電源の投入によって起動するのを防ぐための措置です。

DC バスで過電流や過電圧、低電圧が発生すると、フォルト保護によってドライブは停止します。DC バス過電流の状態は、ラン / ストップ・スイッチをストップ位置に設定することでクリアできます。DC バス過電圧または DC バス低電圧の状態は、MCU リセットによってクリアできます。

How to Reach Us:

Home Page:

www.freescale.com

E-mail:

support@freescale.com

USA/Europe or Locations Not Listed:

Freescale Semiconductor
Technical Information Center, CH370
1300 N. Alma School Road
Chandler, Arizona 85224
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130
support@freescale.com

Europe, Middle East, and Africa:

Freescale Halbleiter Deutschland GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (English)
+46 8 52200080 (English)
+49 89 92103 559 (German)
+33 1 69 35 48 48 (French)
support@freescale.com

Japan:

Freescale Semiconductor Japan Ltd.
Technical Information Center
3-20-1, Minami-Azabu, Minato-ku
Tokyo 106-0047, Japan
0120 191014 or +81 3 3440 3569
support.japan@freescale.com

Asia/Pacific:

Freescale Semiconductor Hong Kong Ltd.
Technical Information Center
2 Dai King Street
Tai Po Industrial Estate
Tai Po, N.T., Hong Kong
+800 2666 8080
support.asia@freescale.com

For Literature Requests Only:

Freescale Semiconductor Literature Distribution Center
P.O. Box 5405
Denver, Colorado 80217
1-800-441-2447 or 303-675-2140
Fax: 303-675-2150
LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com

本書に記載された情報は、システムおよびソフトウェア開発者がモトローラ製品を使用できるよう補助することのみを目的としています。本書に記載された情報に基づく集積回路の設計/製造に関する明示的または暗黙のライセンスを許諾するものではありません。

当社は、本書に記載した製品について、信頼性、機能または設計を改善するために予告なく変更を加える権限を保有しています。当社はここに記載した製品、回路の適用、使用に起因するいかなる責務をも負うものではなく、また、当社の特許権または第三者の権利に基づくライセンスを許諾するものではありません。仕様として記述される「標準 (Typical)」パラメータは各用途において変化する場合があり、実際の性能は長期間で変動する可能性があります。「標準」パラメータを含むすべての動作パラメータは、利用者側で技術担当者が使用環境に応じて適切な値に設定することが求められます。当社の製品は、外科的に人体に移植することを意図したシステムの構成部品として、または、他の生命維持を意図した用途に、または、当社の製品の不具合により人体に危害を加えたり死に至らしめるかもしれない状況が発生するような用途に使用するために、設計、意図または認可されているものではありません。購入者が万一このような意図または認可されていない用途のために当社の製品を購入あるいは使用する場合、購入者は、当社およびその役員、従業員、子会社、関連会社、代理店に対し、直接または間接を問わず、当該使用に関連した傷害や死についてのすべての申し立て（たとえ、当社が部品の設計や製造において不注意であったという主張であったとしても）から生ずるすべての請求、費用、損害、および相当の弁護士費用を補償し、被害が及ばないものとするものとします。



Freescale および Freescale のロゴマークは、フリースケール社の商標です。文中に記載されている他社の製品名、サービス名等は、それぞれ各社の商標です。

© Freescale Semiconductor, Inc. 2004. All rights reserved.

DRM046J
Rev. 0
09/2004
(原文 DRM046 Rev.0, 09/2003)