

RX62T

R01AN0899JU0100

Rev.1.00

エンコーダ付き PMSM モータの位置制御

2013.02.08

はじめに

本書では、永久磁石同期モータを用いた RX62T の位置制御について紹介します。これは、ホールセンサおよびエンコーダとともに RX62T 評価キット上に実装されています。

本書は、ハードウェアプラットフォーム、位置制御の手法、制御ブロック図、ソフトウェア構造、および位置の測定と制御のフローチャートについて説明します。

アプリケーションノートのソリューションは、RX62T の評価キット、および 1000 ラインのシングルエンドエンコーダ付きの 3 相 8 極の 24V PMSM モータを用いて実装されています。

対象デバイス

RX62T

目次

1. 概要	2
2. システムのハードウェアのセットアップと構造	3
3. 仕様と性能データ.....	4
4. RX62T のエンコーダキャプチャ機能	5
5. エンコーダを用いた位置と速度の計算.....	8
6. 位置制御方式.....	11
7. ソフトウェアの説明.....	15
8. モータと位置制御のパラメータ.....	19
Appendix A - References.....	21

1. 概要

位置制御は、オートメーション産業や半導体産業など、さまざまな分野で重要な役割を果たしています。永久磁石同期モータ (PMSM) は、高効率、高トルク対電流比、および低慣性を実現するための高度な位置制御システムに最適であり、産業分野で広範囲に使用されています。高性能の動作制御を実現するためのさまざまな手法が確立されています。

マイクロプロセッサ (MCU) の進歩により、デジタルコントローラの信頼性と性能が継続的に改良されるとともに、サーボ位置制御アプリケーションにおける PMSM の能力が大幅に向上しています。MCU によりデジタル制御を実装することができます。アナログベースのステップ制御よりも優れているのは、そのコントローラがはるかにコンパクトで、信頼性と柔軟性を備えているからです。PMSM の高度な性能は、磁界方式の制御によって得られるため、デジタルベースのシステムによってのみ実現できます。

RX62T は、最大動作周波数 100MHz で 165DMIPS の 32 ビットの高性能マイクロコントローラで、単精度浮動小数点ユニット (FPU) を搭載しています。サーボ動作の制御を容易にするため、多機能タイマ (MTU、GPT)、高速 12 ビット A/D コンバータ、およびエンコーダの信号キャプチャ機能が装備されています。

本アプリケーションノートは、RX62T の浮動小数点ユニット (FPU) を用いた位置動作制御システムを提案するものです。位置調整機能の開発により軌跡ジェネレータと PID コントローラの両方を提供しています。これにより、正確な位置制御と高速な追跡が行われることを確実にしています。軌跡ジェネレータには位置の設定値指令が用意されています。位置 PID コントローラは位置誤差に対して作用し、電流指令を出力します。磁界方式の制御による電流調整が実装され、高速な動的応答を確保しています。

開発したソフトウェアは、以下のデバイスとプラットフォームに適用することができます。

- MCU : RX62T および RX62N
- モータ : 3 相永久磁石同期モータ (PMSM)
- プラットフォーム : ルネサス RX62T デモキット
- 制御アルゴリズム : エンコーダを用いた位置制御

2. システムのハードウェアのセットアップと構造

RX62T の FPU ベースの位置制御は、図 1 に示すように、ルネサス RX62T 評価キットと 3 相 PMSM モータ (1000 ラインのシングルエンドエンコーダ付き) を用いて実装されています。

RX62T の評価キットは、RX シリーズのマイクロコントローラ RX62T をベースにした単一ボードのインバータです。

- 低電圧モータとともに 3 相インバータをボードに搭載
- 24V 外部電源により DC バス電圧の 15V と 5V の電源を供給
- 電源デバイスはルネサスの低電圧 MOSFET を使用
- 電力定格：最大 120 ワット
- 3 シャントと単一シャントの電流測定をサポート
- 外部アンプから内部 PGA に簡単にジャンプで変更可能
- H8S2212 MCU を介した PC との USB 通信
- GUI を使用して、モータと制御のパラメータを修正、および速度と位置の両方の制御をチューニング
- ホールセンサとエンコーダを接続するためのコネクタ
- LCD ディスプレイによる動作ステータスの監視
- ポテンショメータと押しボタンで設定されるスタンドアロンモードのサポート
- 第 2 モータの駆動をサポート、別のモータ制御電力段用の信号とコネクタが使用可能

モータは、24V で 4 ペア極の 3 相永久磁石同期モータで、以下を装備しています。

- 3 つのホールセンサ
- 1000 ラインの直交エンコーダ

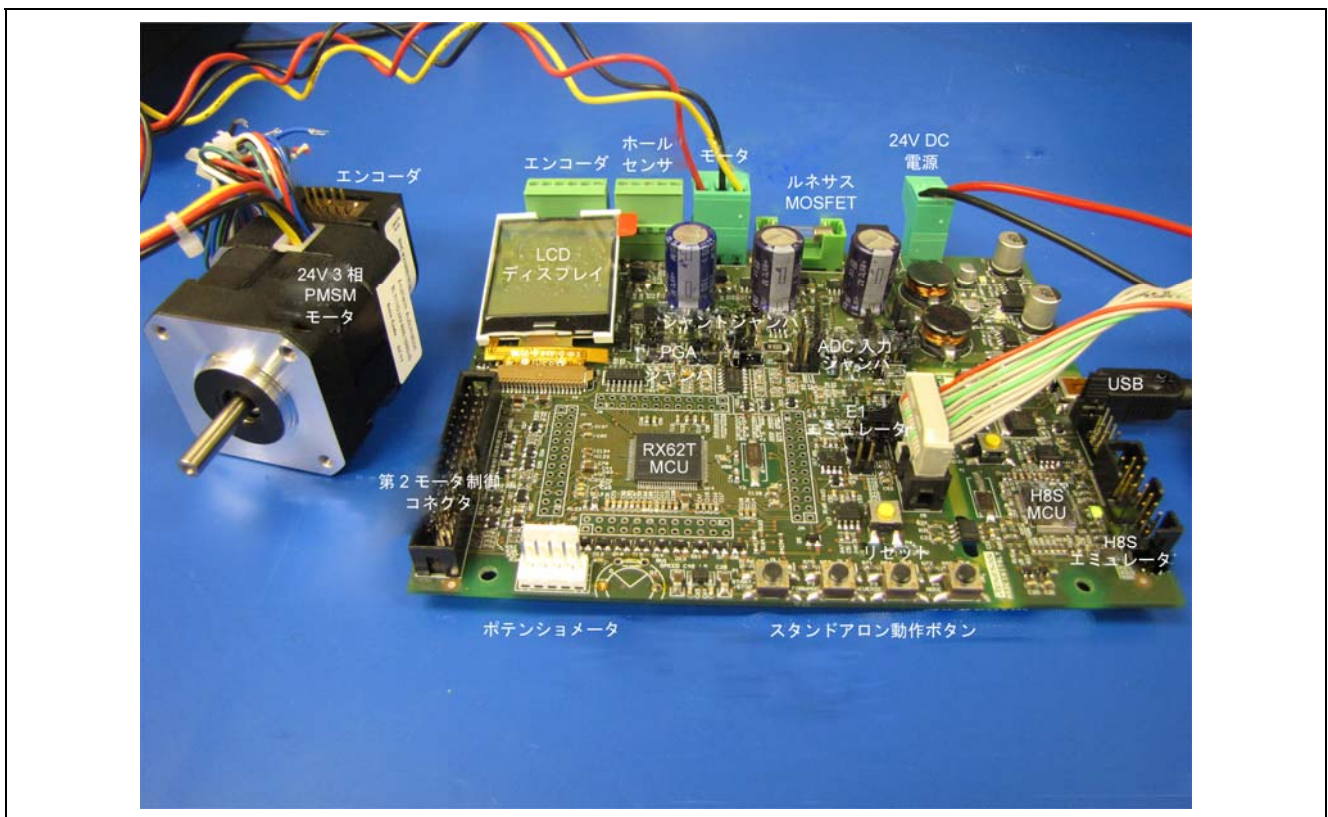


図 1 システムのハードウェアのセットアップ (モータと制御のプラットフォーム)

3. 仕様と性能データ

位置制御は、ルネサス評価キットと RX62T MCU を使用して実装されており、その主な仕様データを以下に示します。

- 入力電圧：24VDC
- 定格バス電圧：24V
- 出力電圧：24VAC
- 定格出力電力：120W
- PWM スイッチング周波数：20KHz
- 制御ループ周波数：10KHz
- 電流測定：3 シャント抵抗器
- 位置測定：1000 ライン直交エンコーダ
- 実装：FPU
- CPU 処理能力：17%
- 使用フラッシュメモリ：13.444K バイト
- 使用 RAM：1.725K バイト
- 使用スタック：336 バイト

4. RX62T のエンコーダキャプチャ機能

RX62T は、最大動作周波数 100MHz で 165DMIPS の 32 ビットの高性能マイクロコントローラで、単精度浮動小数点ユニット (FPU) を内蔵しています。モータ制御を容易にするため、多機能タイマ (MTU、GPT)、高速 12 ビット A/D コンバータ、および 10 ビット A/D コンバータが搭載されています。図 2 は、ルネサス RX62T マイクロコントローラを用いた PMSM モータのセンサレスベクトル制御のブロック図を示しています。

RX62T には、図 2 に示すように、エンコーダ測定のための専用の機能があります。MTU3 タイマの外部クロック入力 TCLKA、TCLKB、TCLKC、および TCLKD を 2 相エンコーダのパルス入力として使用できます。MTU3 タイマのチャンネル 1 と 2 が位相計数モードによって指定されると、外部のエンコーダクロックがカウンタの入力クロックとして選択され、TCNT がアップ/ダウンカウンタとして動作します。2 つの外部入力クロック間の位相差が検出され、それに応じて TCNT がインクリメントまたはデクリメントされます。ロータの位置と速度は、TCNT カウントを読み取ることで測定することができます。

以下に、エンコーダパルスをカウントする MTU3 の機能についてまとめています。

- MTU チャンネル 1 および 2 が 2 相のパルス計数モードをサポートしています。これは「位相計数モード」と呼ばれます。
- この機能は、4 つのモードに対応できます。
- これらのモードでは、カウンタはアップ/ダウンカウンタとして機能します。またフラグを用いてカウンタの方向を検出することができます。
- モード 1 とモード 4 の A 相と B 相間の位相差を検出することによるアップ/ダウンカウント
 モード 1: 両方のエンコーダパルスの各立ち上がりエッジと立ち下りエッジ
 モード 4: B 相のエンコーダパルスの各立ち上がりエッジと立ち下りエッジ
- 2 つのパルスラインによるアップ/ダウンカウント。これにより方向、速度、および位置を示す。
 モード 2: 1 つのパルスラインと 1 つの方向
 モード 3: 各方向に 2 つのパルスライン
- MTU は自動的に速度と位置のデータをパルス幅とパルスとして検出することができます。速度と位置のデータは各周期サイクルに取り込むことができます。

このアプリケーションでは、エンコーダパルス A と B は、TCLKA と TCLKB に入力されます。Z パルスは IRQ0 に入力されます。第 2 モータの場合、エンコーダパルス A と B は、TCLKC と TCLKD に入力されます。Z パルスは IRQ3 に入力されます。

グラフィカルユーザインタフェース (GUI) を使用した RX62T MCU とのホスト通信は、USB 通信によって行われます。リアルタイムにモータ動作ステータスを表示し、モータと制御のパラメータをチューニングすることができます。速度制御と位置制御の両方についてモータを駆動することができます。

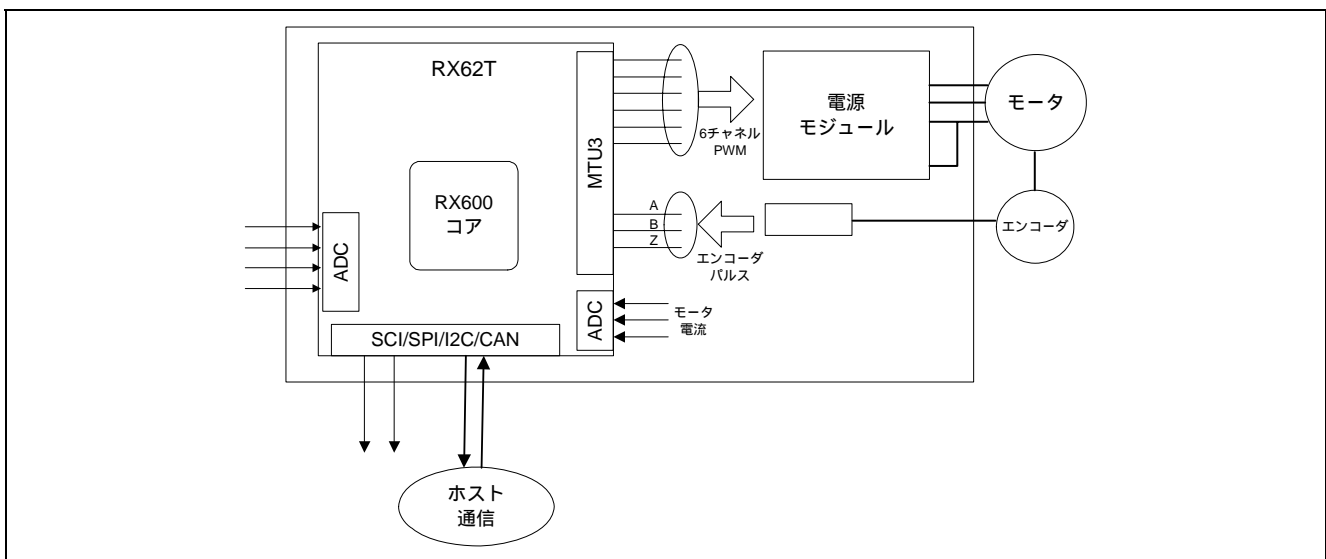


図 2 RX62T エンコーダキャプチャ機能

表1は、エンコーダキャプチャのためのチャンネル0~2のタイマレジスタ機能を示しています。タイマMTUにより、速度制御のループ周期ごとにエンコーダのパルス幅とパルス数の両方を自動的に検出することができます。トリガ信号のための外部配線は不要です。エンコーダの信号は、チャンネル2のクロックソースとしてタイマの外部クロック (TCLKA と TCLKB) に直接入力されます。また入力指令パルスが、チャンネル2のクロックソースとしてタイマの外部クロック (TCLKC と TCLKD) に直接入力されます。

- チャンネル1のカウンタは、エンコーダパルスの各立ち下りエッジと立ち上がりエッジによってカウントされます。
- チャンネル0は、チャンネル1とチャンネル2のインプットキャプチャトリガおよび速度制御ループの割り込みを生成するための間隔時間に使用されます。
- チャンネル2はパルス指令入力を測定します。
- チャンネル0のコンペアマッチ (速度制御ループ周期) は、内部でチャンネル1のインプットキャプチャトリガとして選択することができます。
- チャンネル1とチャンネル2の外部タイマクロック (エンコーダパルスまたは指令パルス) は、内部でチャンネル0のインプットキャプチャトリガとして選択することができます。

表1 MTU タイマレジスタ機能

チャンネル	レジスタ / カウンタ	機能	データ
0	TCNT0 (Ch0 カウンタ)	内部クロックによるフリーランニングタイマ	インターバルタイマ
	TGR0A	インプットキャプチャレジスタ (Ch1 カウンタクロック用に使用される、エンコーダパルスの各エッジによってトリガ)	エンコーダパルスのパルス幅
	TGR0B	アウトプットコンペアレジスタ (Ch1 および Ch2 用のインプットキャプチャトリガを生成するため)	速度制御ループ周期
	TGR0C	TGRA0 のバッファレジスタ	パルス幅の最終データ
	TGR0D	アウトプットコンペアレジスタ (Ch1 および Ch2 用のインプットキャプチャトリガを生成するため)	位置制御ループ周期
1	TCNT1 (Ch1 カウンタ)	エンコーダパルスによるアップ/ダウンカウンタ	アップ/ダウンカウンタによって位置と速度を表示
	TGR1A	インプットキャプチャレジスタ (Ch0/TGR0B のコンペアマッチによるトリガ)	各速度制御ループ周期におけるエンコーダのパルス数
	TGR1B	インプットキャプチャレジスタ (Ch0/TGR0D のコンペアマッチによるトリガ)	各位置制御ループ周期におけるエンコーダのパルス数
2	TCNT2 (Ch2 カウンタ)	指令入力によるアップ/ダウンカウンタ	アップ/ダウンカウンタによって速度と位置の指令を表示
	TGR2A	インプットキャプチャレジスタ (Ch0/TGR0B のコンペアマッチによるトリガ)	各速度制御ループ周期における指令のパルス数
	TGR2B	インプットキャプチャレジスタ (Ch0/TGR0D のコンペアマッチによるトリガ)	各位置制御ループ周期における指令のパルス数

図3は、MTUが位相計数モードでエンコーダ信号を取り込む方法を示しています。チャンネル1とチャンネル0はともに、位置または速度を検出するためのサーボモータの2相エンコーダパルスが入力されます。チャンネル1は位相計数モード1に設定され、エンコーダパルスA相とB相はMTCLKAとMTCLKBに入力されます。チャンネル0では、MTU3_0.TGRCのコンペアマッチがTCNTのクリアソースとして指定され、MTU3_0.TGRAとMTU3_0.TGRCはコンペアマッチ機能に使用され、速度制御サイクルと位置制御サイクルを用いて設定されます。MTU3_0.TGRBは入力キャプチャに使用され、MTU3_0.TGRBとMTU3_0.TGRDがバッファモードで動作します。チャンネル1のカウント入力クロックは、MTU3_0.TGRBの入力キャプチャソースに指定され、2相エンコーダの4倍パルスが検出されます。チャンネル1のMTU3_1.TGRAとMTU3_1.TGRBは、入力キャプチャ機能に指定され、チャンネル0のMTU3_0.TGRAとMTU3_0.TGRCのコンペアマッチは、制御サイクルのアップ/ダウンカウンタ値を保存するための入力キャプチャソースとして選択されます。

したがって、RX62T MTU 自体で、モータの速度と位置を推定するために必要なパルス幅とパル数を正確に検出することが可能となります。速度と位置を検出するのにCPUの負荷をほとんど必要としません。またMTUは、パルス指令も受け取ることができます。

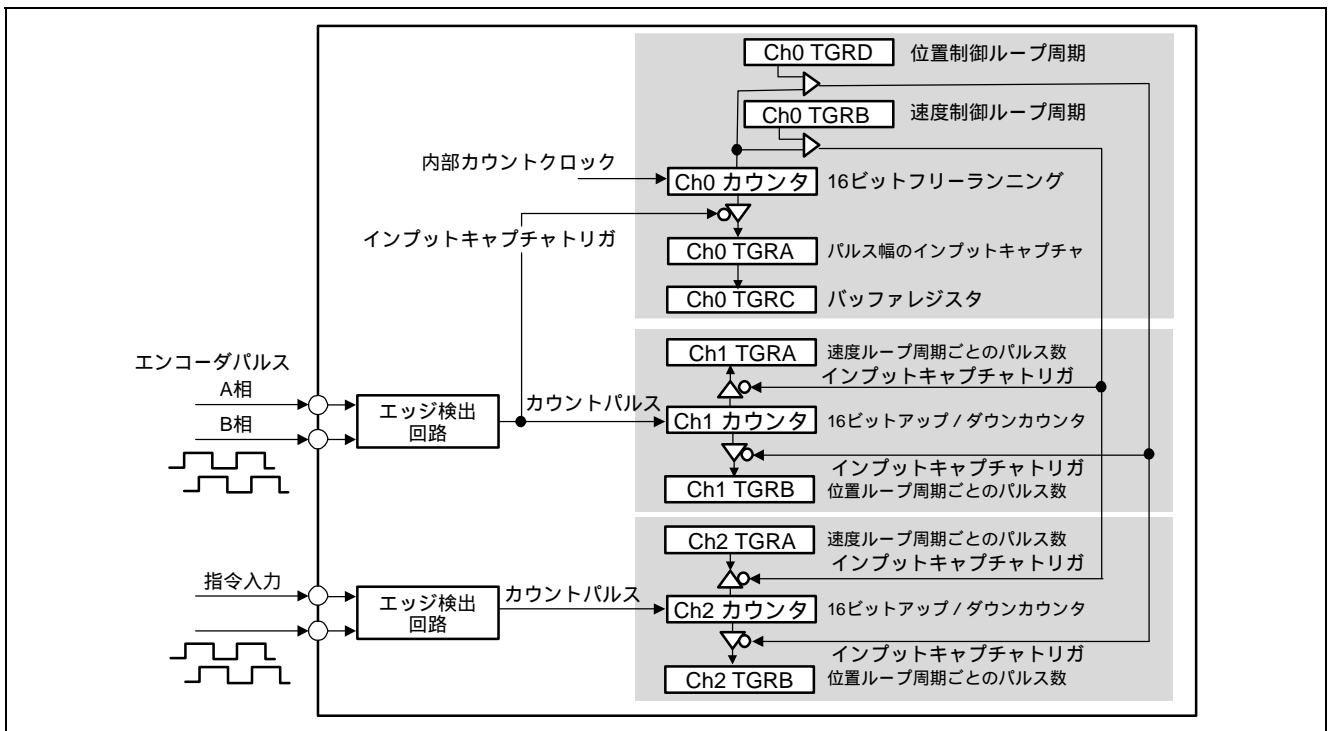


図3 位相計数モードでのエンコーダパルスキャプチャ

5. エンコーダを用いた位置と速度の計算

5.1 位置と速度の測定

デジタルエンコーダは、図 4 に示すように、3 つのパルス列すなわち A、B、および Z を出力します。これらのパルスは、イベントをカウントする TCLKA と TCLKB のタイマユニットに供給されます。パルス A と B は、90 度のオフセットが得られるよう間隔が 4 分の 1 だけずれているため、直交カウントと呼ばれています。パルス Z は 1 回転につき 1 つだけ出力されます。これは割り込み入力 (IRQ0) に供給され、カウンタ MTU2_TCNT を初期化 (リセット) します。パルス Z が出力される時、ステータフレームに対するロータの角度は確定値 (できればゼロ) を生成します。この値がゼロでない場合には、測定可能な一定のオフセットになります。直交カウンタは、A が B の前に生じるのか、B の後に生じるのかによって、これらのパルスをカウントアップまたはカウントダウンします。つまり、A と B の間の関係が回転の方向を示すこととなります。

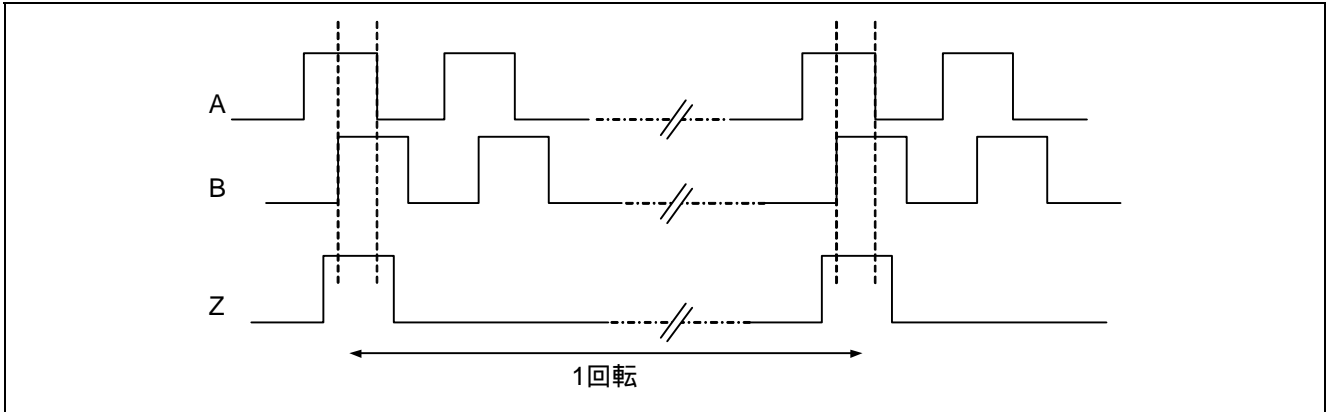


図 4 デジタルエンコーダのパルス A、B、および Z の関係

エンコーダは、初期位置がゼロのホールセンサ U に対して調整され校正されています。角度は、外部割り込み IRQ0 を通じて Z パルスが出力されたときにゼロカウントになります。この時点以降、直交カウンタを読み取った特定のカウンタが与えられます。図 5 に示すように、位相計数モード 1 を使用すると、A 相と B 相の間の位相差を検出することでカウントアップまたはカウントダウンします。このカウントは、ロータの位置に対応する適正な角度の値に変換されます。

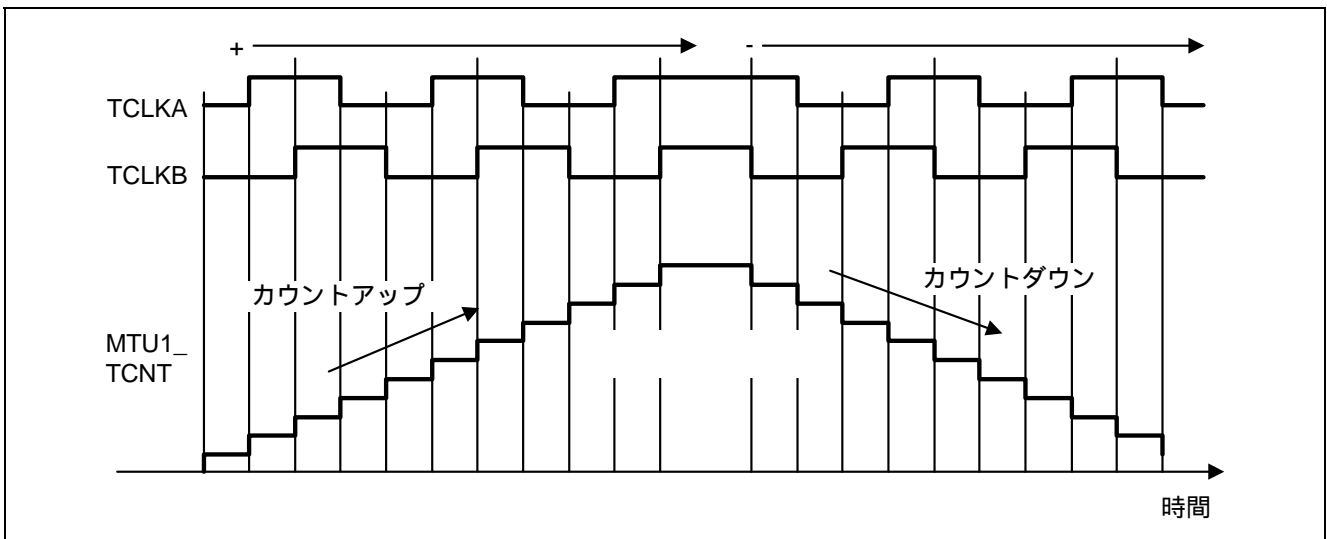


図 5 エンコーダの計数モードの動作

モータの速度によって、時間経過に対するロータの角度の変化が決まります。図 6 に示すように、制御ループの周期にてエンコーダからのパルス A と B を使用します。一定の時間間隔で 2 つの角度を測定することで、速度の計算に必要な測定値 (デルタ角度とデルタ時間) が得られます。速度はデルタ角度 をデルタ時間で除算することで計算されます。

モータの位置は、エンコーダパルスの数 $N(m) - N(m)$ になります。

$$= N(m+1) - N(m)$$

モータ速度は次のようになります。

$$r = (N(m+1) - N(m)) / T_{sp}$$

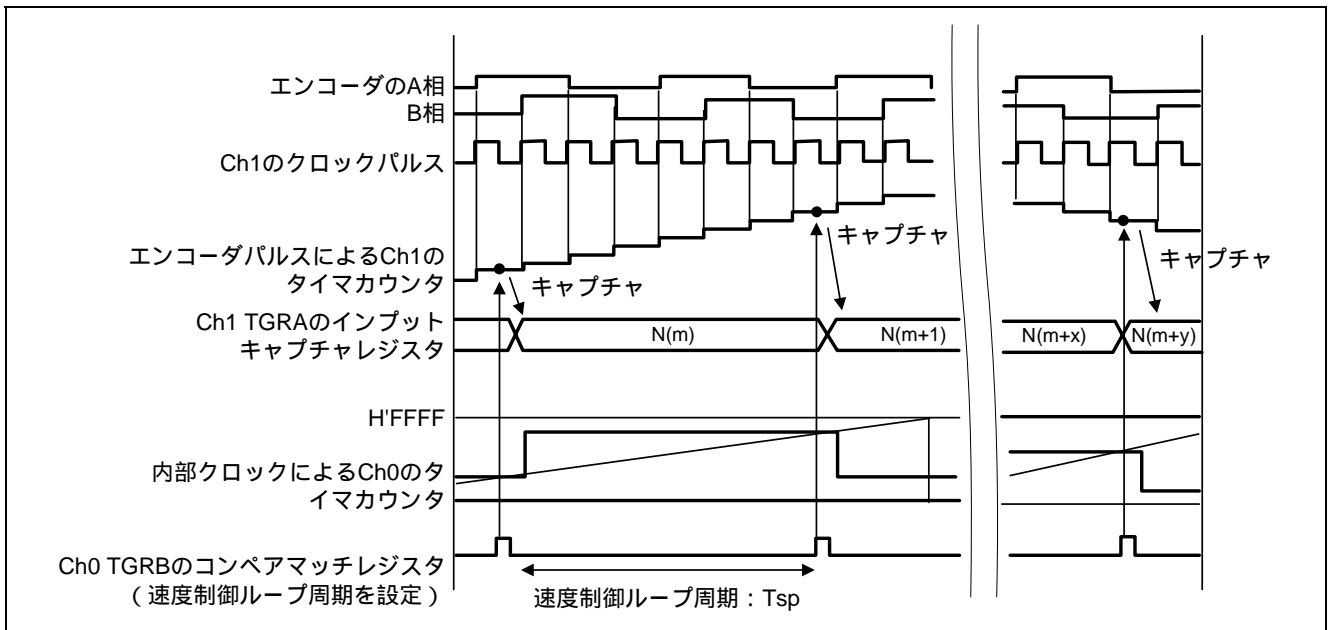


図 6 制御ループの周期にてエンコーダパルス A と B を使用して速度を計算

5.2 初期位置の識別

インクリメンタルエンコーダが供給できるのは初期位置からの変位のみであり、絶対的な位置を提供することはできません。PMSM モータと位置を制御する場合、初期位置が必要となります。位置合わせは校正されていますが、Z パルスより前の初期開始位置はこれだけでは不明です。

ホールセンサを用いることで、ロータの初期位置を識別することができ、またロータが回転を開始するときに位置を修正することができます。図 7 に示すように、ホールセンサが各相に配置されていると仮定します。ホールセンサの出力信号を図 8 に示します。ホールセンサ信号の分解能は 60° (電気角度) であることがわかります。表 1 は、各位置に対応した、可能な組み合わせを示しています。

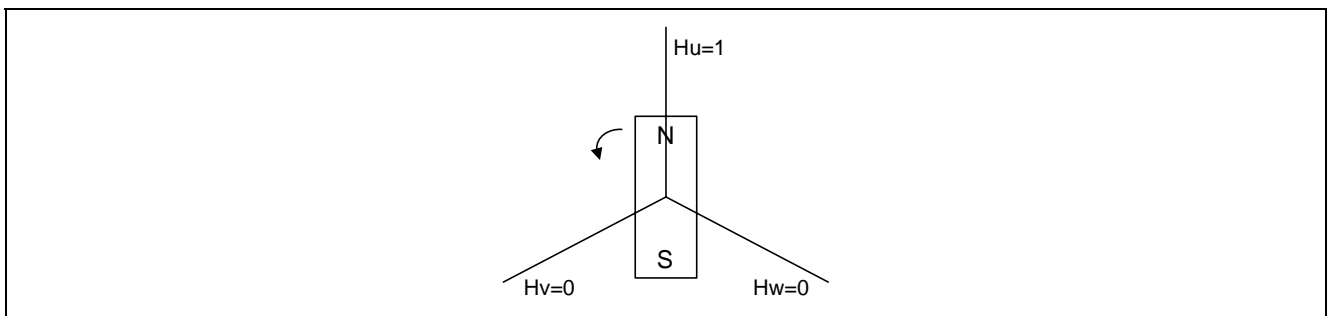


図 7 初期ロータ位置のホールセンサ

図 8 と表 2 にある特定のホールセンサの出力の組み合わせにより、ロータが位置する 60° 範囲の区画が決まります。初期位置は、次のようにして求められます。一連の出力信号が得られた場合(たとえば 101)、ロータが位置する区画を決定することができます(この例では区画 1 になります)。区画の中央(この例では 30°)に初期位置を設定することができます。初期位置の最大誤差は 30° であることがわかります。この最大誤差は、ロータが 2 つの区域の端にあるときに発生します。ただし、 30° の誤差があっても、モータは、モータを起動するだけのトルクを生成することができます。

いったんモータが回転を開始すれば、ロータが初期区域から出て次の区画に入った時点で、その位置を容易に修正することができます。この位置は正確です。前の例では、モータが区画 1 から正の方向に回転を開始し、位置が 60° になった時点でロータ位置を修正することができます。

表 2 ホールセンサとロータ位置の関係

区画	Hu	Hv	Hw	ロータ位置
1	1	0	1	0~60
2	1	0	0	60~120
3	1	1	0	120~180
4	0	1	0	180~240
5	0	1	1	240~300
6	0	0	1	300~360

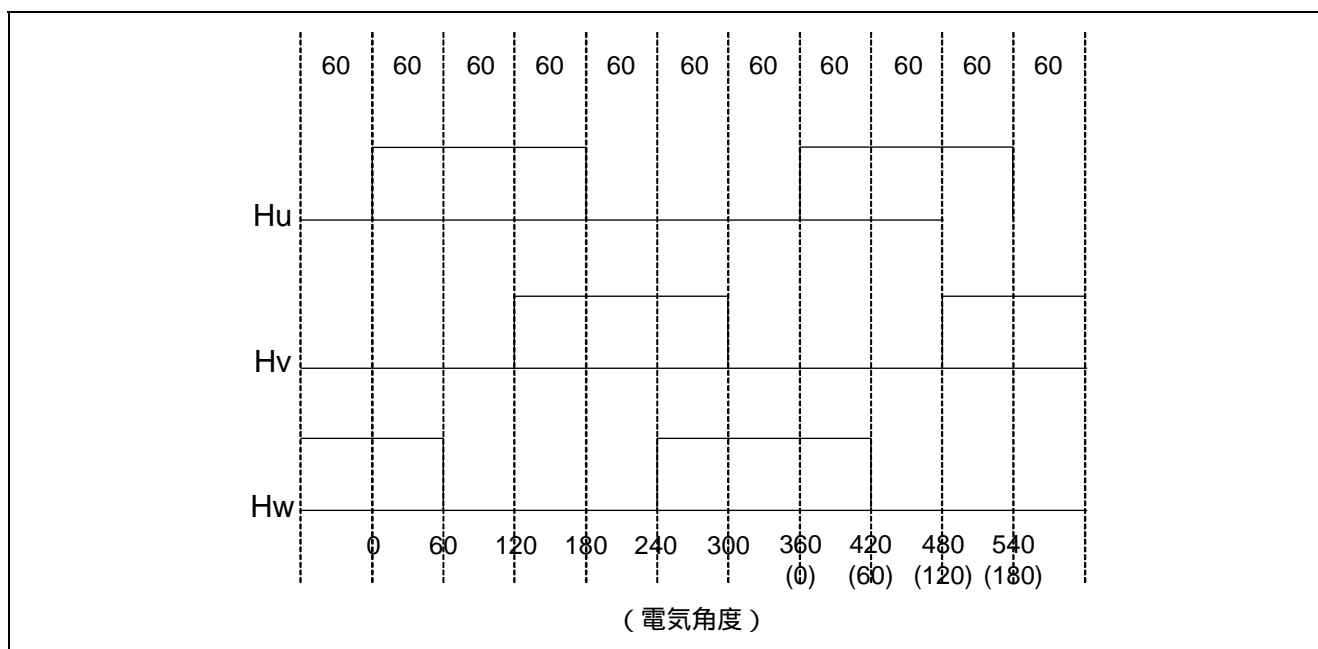


図 8 ホールセンサの出力信号

6. 位置制御方式

6.1 位置制御のブロック図

図9は、位置制御のブロック図です。開発した位置制御には、2つのループが含まれています。外側ループは、モータを追跡して所定の位置を保持する位置制御です。内側ループは、電流制御です。これは実際にはトルクの制御ループです。モータの電流は、3つのシャント抵抗を通じてサンプリングされ、dq軸の電流に変換されます。ここでの制御ループとはトルクを得るためにq軸の電流を制御することです。

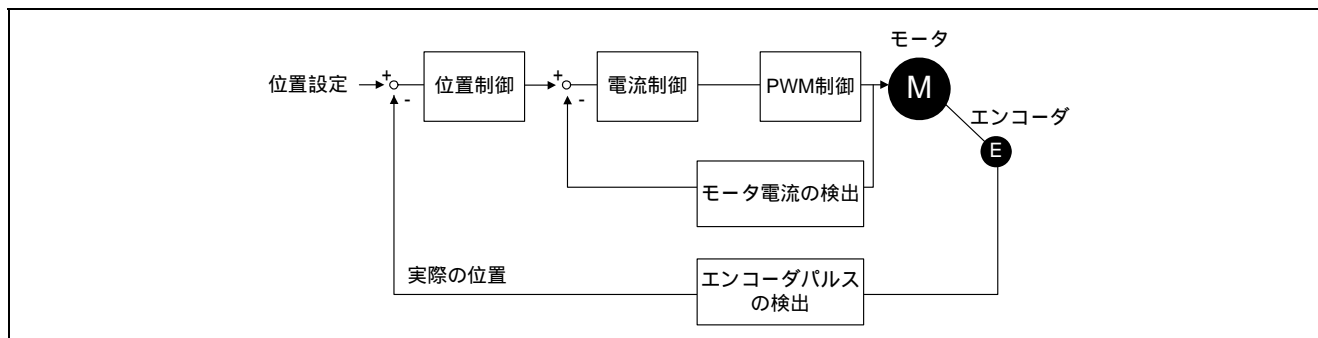


図9 位置制御のブロック図

PMSMの位置制御の方式を図10に示します。システムには、ベクトル制御を使用する電流調整の内側ループと、位置調整の外側ループがあります。この二重ループの構造は、ベクトル制御、高精度位置、および位置コントローラによる高速追跡性能を使用することで高速トルク応答を実現しています。

d軸とq軸の電流を求めるためには、相電流を測定する必要があります。ベクトル表現ではクラーク変換とパーク変換を使用して、(u, v, w)フレームで測定した相電流を最初に静的直交(a, B)フレーム(90度離れている)に変換し、次にロータフレームに変換します。これも直交フレームですが、(d, q)フレームと呼ばれる磁場軸に沿って調整されています。これらの変換は、ロータ角度について超越関数のサインとコサインを使用しているため、計算を行うときにロータの角度が既知であることが必要条件になります。位置制御には、電流センサが必要なことに加えて、ロータシャフトにエンコーダを取り付けてロータの位置を測定する必要があります。

いったん電流が(d, q)フレームに変換されれば、制御アルゴリズムは単純にPIDまたはPIループを実行して、トルクと磁束に必要な電圧を計算します。次に、この必要な電圧(V_{dc} , V_{qc})は、逆クラーク変換と逆パーク変換を使用して(u, v, w)フレームに変換され、さらにPWMのデューティサイクルが計算されます。

位置指令は、位置制御システムへの入力です。モータのロータにはエンコーダが取り付けられており、直交パルスAとB、さらにはゼロ同期パルスZが出力されます。3つのロータ位置信号のすべてがMCUのインプットキャプチャおよびタイマ/直交カウンタの周辺回路に送信され、これにより位置と速度の測定が行えるようになります。指令位置は実際のロータの位置と比較されます。位置調整器は、従来のPIDコントローラを使用して、トルク制御指令 i_{q^*} を出力し、モータの移動と指令位置の追跡を行います。

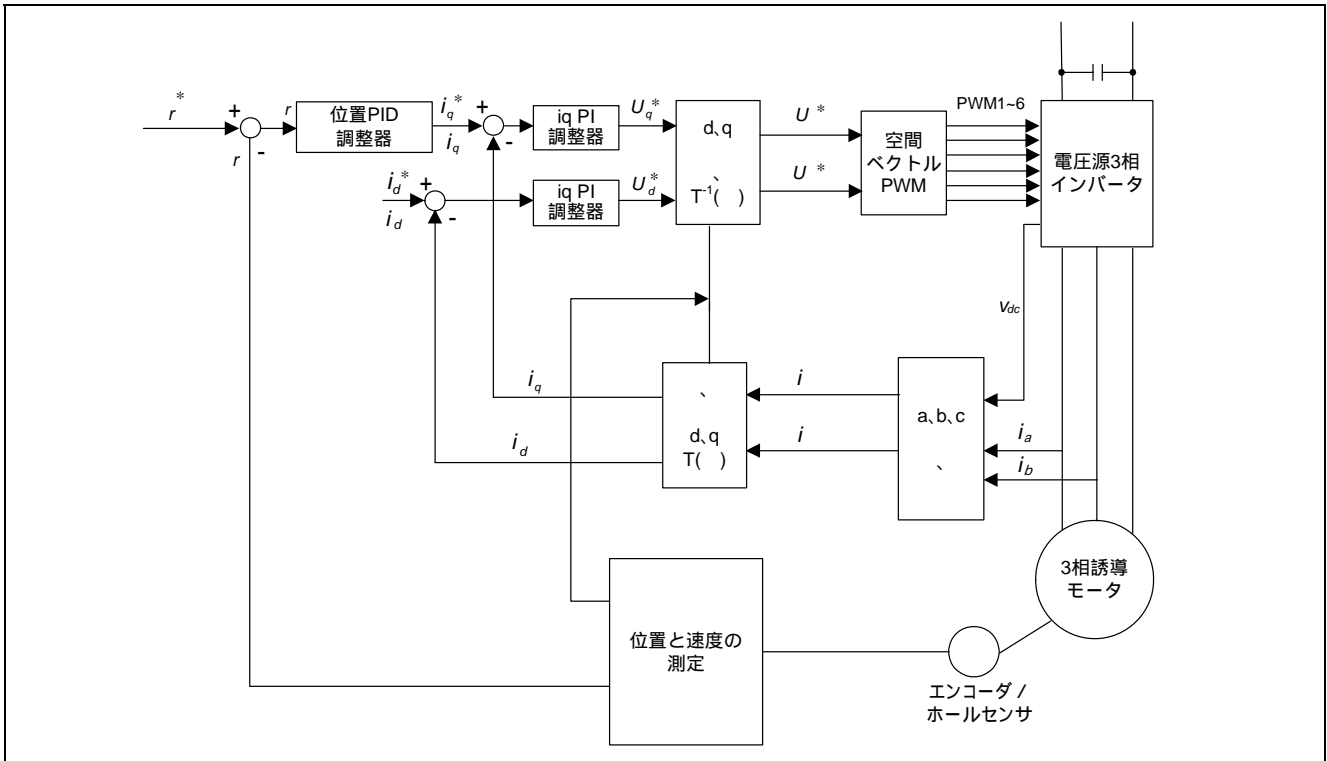


図 10 位置制御方式図

6.2 位置制御ループの設計

標準的なサーボ位置制御システムの基本コンポーネントを図 11 に示します。この図では、次節で説明するようにサーボ位置制御はカレントループを閉じており、線形伝達関数 $G_{ireg}(s)$ として単純にモデル化されています。当然、サーボ駆動にはピーク電流制限があるため、この線形モデルは完全には正確ではありません。ただし、分析用としては妥当な表現になります。これを説明するため、相対的に低い方の動作周波数のユニティとして電流調整器（実際にはトルク調整器）の伝達関数を概算することができます。

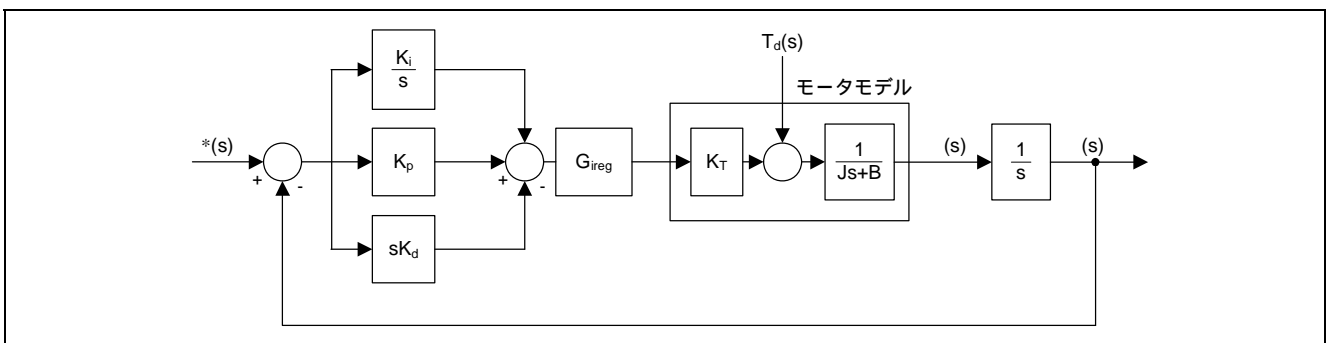


図 11 位置 PID コントローラのトポロジ

PMSM モータは、集中慣性 J 、粘性減衰項 B 、およびトルク定数 K_t としてモデル化されています。集中慣性項は、サーボモータと負荷の慣性の両方から構成されます。また、負荷は、ねじれ剛性によって自然機械的共振点が位置コントローラの帯域幅を十分に超える程度に剛結合されていると仮定します。この仮定により、制御可能な周波数について、モータと負荷の慣性の和として全システム慣性をモデル化することができます。

モータの軸に直結されたエンコーダが実際のモータ位置 (s) を測定します。軸トルクの外部擾乱 T_d がモータの電流によって生成されるトルクに加わることによって、全慣性 J の加速に利用可能なトルクが得られません。

電流調整器の周りのモータブロックは、位置ループを閉じるサーボ位置コントローラです。基本サーボ位置コントローラは、軌跡ジェネレータとPIDコントローラの両方を提供します。軌跡ジェネレータは、図9に $\theta^*(s)$ と表示された位置の設定値指令のみを提供します。PIDコントローラは位置誤差に対して作用し、電流指令を出力します。

PIDコントローラには、調整するゲインが3つあります。K_p、K_i、およびK_dです。これらのゲインはすべて、以下で定義される位置誤差に対して作用します。

$$\Delta\theta = \theta^*(s) - \theta(s)$$

上付き文字「*」は、指令値であることを示しています。

PIDの出力は、以下に示すように、時間領域内で数学的に表されます。

$$i_q^*(t) = K_p \Delta\theta(t) - K_i \int \Delta\theta(t) dt + K_d \frac{d}{dt} \Delta\theta(t)$$

大ざっぱに言うと、比例項は、位置誤差に対するシステムの全体応答に影響します。積分項は、定位置指令に対して定常位置誤差を強制的にゼロにするために必要になり、微分項は、減衰動作を実現するために必要になります（応答が振動性を示すため）。残念ながら3つのすべてのパラメータは相互に関連しているため、1つのパラメータを調整すると以前のパラメータ調整のいずれかに影響することになります。

PIDコントローラのチューニングは、モータと負荷のパラメータが既知で、所望の周波数応答が既知の場合に行うことができます。これらは、ヘッダファイル「customize.h」内の以下のパラメータを使用して調整されます。

6.3 電流制御ループ

電流ループは、標準のパーク-クラーク固定基準座標系から回転基準系への変換に基づく標準PIタイプです。初期ロータ位置は、ホールセンサを使用することで決定されます。いったんホールの遷移が発生すると、インクリメンタルエンコーダを読み取ることでロータの位置が決定されます。電流ベクトル制御の基本ブロック図を図12に示します。

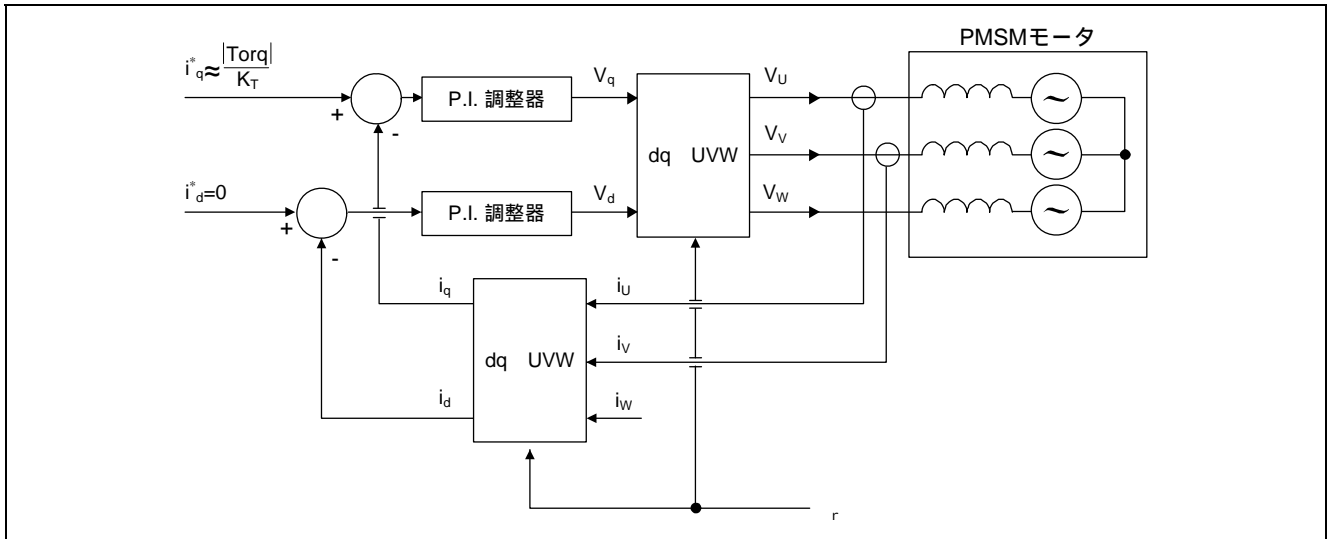


図12 電流ベクトル制御のブロック図

モータの特性を度外視すると、q 軸の指令電流 i_q^* は、指令トルクに対して直線性を示します。弱め界磁は不要なため、「d」軸の電流指令 i_d^* はゼロに設定されます。変換は 2 段階で行われます。最初に、定常電流が任意の固定ペアの直交軸、 d 軸と q 軸に変換されます。次いで、制御目的のため、この軸がロータ軸に対して回転されます。

標準電流の PI コントローラを図 13 に示します。 K_p と K_i は、それぞれ比例ゲインと積分ゲインであり、ソフトウェアによって調整することができます。ハードウェアゲイン K_b はバス電圧を考慮しています。

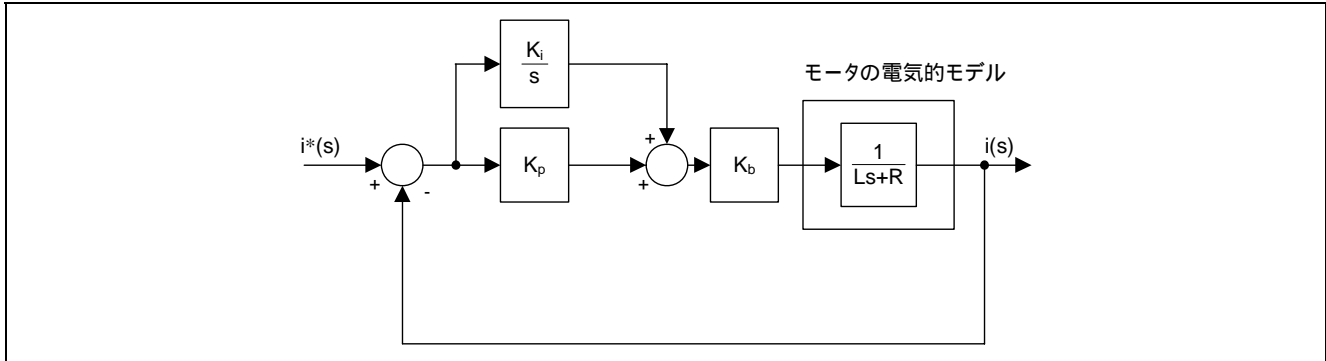


図 13 電流 PI コントローラのトポロジ

ブロック図の伝達関数は、次のとおりです。

$$\frac{i(s)}{i^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_p K_b}{L}\right)s + \left(\frac{K_i K_b}{L}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_p K_b + R}{L}\right)s + \left(\frac{K_i K_b}{L}\right)}$$

これは、以下の形式による特性方程式になります。

$$s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 = 0$$

したがって

$$K_p = \frac{2L\xi\omega_0 - R}{K_b}$$

$$K_i = \frac{\omega_0^2 L}{K_b}$$

システムは、実数ゼロを加えた標準の 2 次応答を示します。システムをチューニングするには、最初に K_p に対して高周波数 500Hz を設定し、次に徐々に積分項 K_i を増やして、定常状態の誤差をゼロにします。

7. ソフトウェアの説明

7.1 ソフトウェアの全体構造

位置制御アルゴリズムは、ルネサスの RX62T MCU 浮動小数点ユニットを使用して、完全な C コードで実装されています。ソフトウェアの全体構造を図 14 に示します。

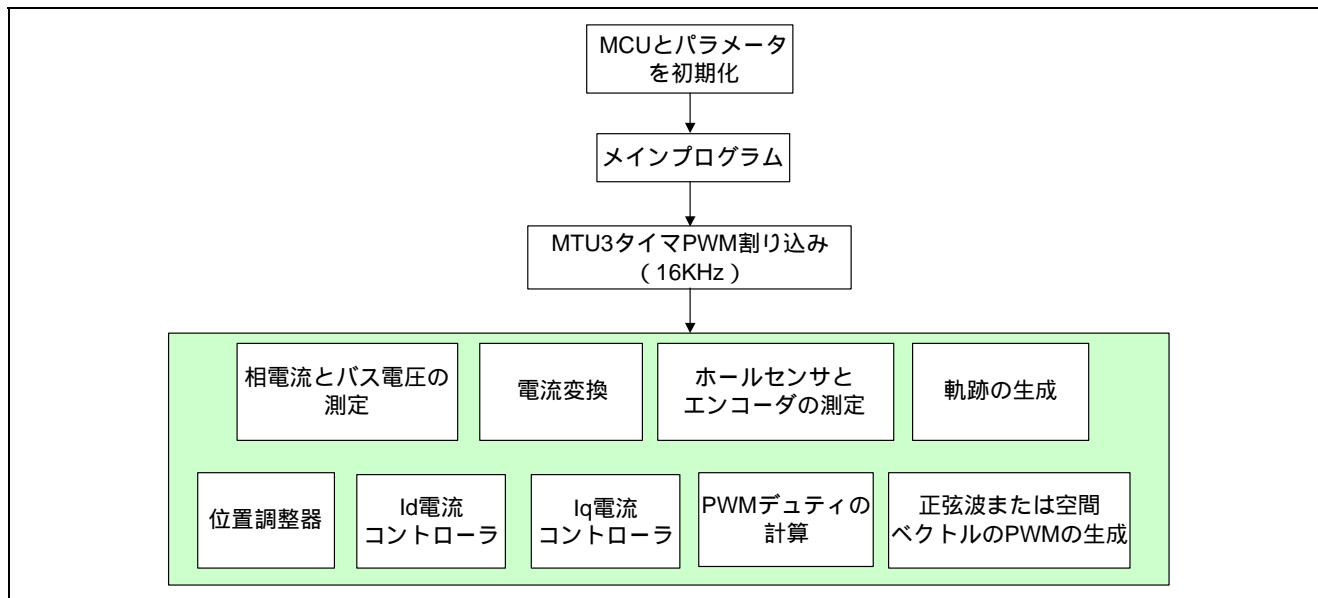


図 14 位置ソフトウェアのアーキテクチャ

手順は以下のとおりです。

- RX62T MCU、モータ、および制御の各パラメータの初期化
- 電流オフセットの計算
- バス電圧と相電流の測定
- ホールセンサとエンコーダの読み取り
- 初期位置の識別
- ロータ位置の計算
- ベクトル制御の変換
- 動作プロファイル – 軌跡の生成
- 位置調整器
- 電流コントローラ
- PWM デューティの計算
- 空間ベクトル PWM の生成

7.2 ソフトウェア HEW ワークスペース

ルネサスの HEW コンパイラを使用した位置制御のワークスペースを図 15 に示します。

- すべてのコードは、浮動小数点の C 言語で記述されています。
- ソフトウェアは、位置制御ブロック図に従ってモジュール化されています（図 10 に示すとおり）。
- I/O 定義と基本 MCU ドライバは自動的に HEW によって生成されます。
- モータと制御のパラメータは、「customize.h」ヘッダファイルと GUI ユーザーインターフェースを通じて簡単にチューニングできます。

コードには、dbset.c、hwsetup.c、intprg.c、main.c、mcrlibf.c、motorcontrol.c、resetprg.c、userif.c、および vectbl.c が含まれています。

- dbstc.c には、ランタイムライブラリが使用する構造体が含まれており、未初期化グローバル変数の消去と、初期化グローバル変数セクションへの初期値の書き込みの両方を実行します。
- hwsetup.c は、ハードウェアの初期化です。
- vecttbl.c には、ISR のアドレスの配列が記述されています。
- resetpr.c には、リセット後に呼び出される関数が含まれています。
- intprg.c は、すべての標準 ISR ベクトルのエントリポイントです。
- main.c の内容としては、制御パラメータ、MTU3 タイマ、割り込み、シリアル通信、エンコーダキャプチャ定義の初期化、および EEPROM パラメータのアップロードがあります。電流センサのオフセットは、PWM の出力の前に計算されます。While ループは、グラフィカルユーザインターフェースを用いてパラメータの更新および SCI 通信を実行しています。
- motorcontrol.c は、位置制御の主要なコードであり、位置制御を実装する関数および関数呼び出しのほとんどが含まれています。
- mcrplibf.c には主として、ベクトル制御の変換が含まれます。これには、クランク、パーク、逆クランク、逆パークの各変換、および正弦波 PWM と空間ベクトル PWV の生成があります。



図 15 エンコーダ計数モード動作の位置制御ソフトウェアのワークスペース

7.3 ホールとエンコーダを用いた位置と速度の測定

図 16 は、位置測定のフローチャートです。ホールセンサとエンコーダを用いた位置測定の手順は、以下のとおりです。

- ホールセンサとエンコーダキャプチャタイマのレジスタと I/O ポートを初期化する
- ホールセンサを使用してロータの初期位置を識別する
- モータを動作させ、エンコーダパルスを使用して位置を取り込む

- ホール整流が変化するとロータ位置を校正する
- 校正後、ロータ位置を再計算する
- エンコーダの Z パルスをチェックし、位置のオフセットとエンコーダパルスキャプチャタイマカウンタをリセットする
- ロータの位置とモータの速度を計算する

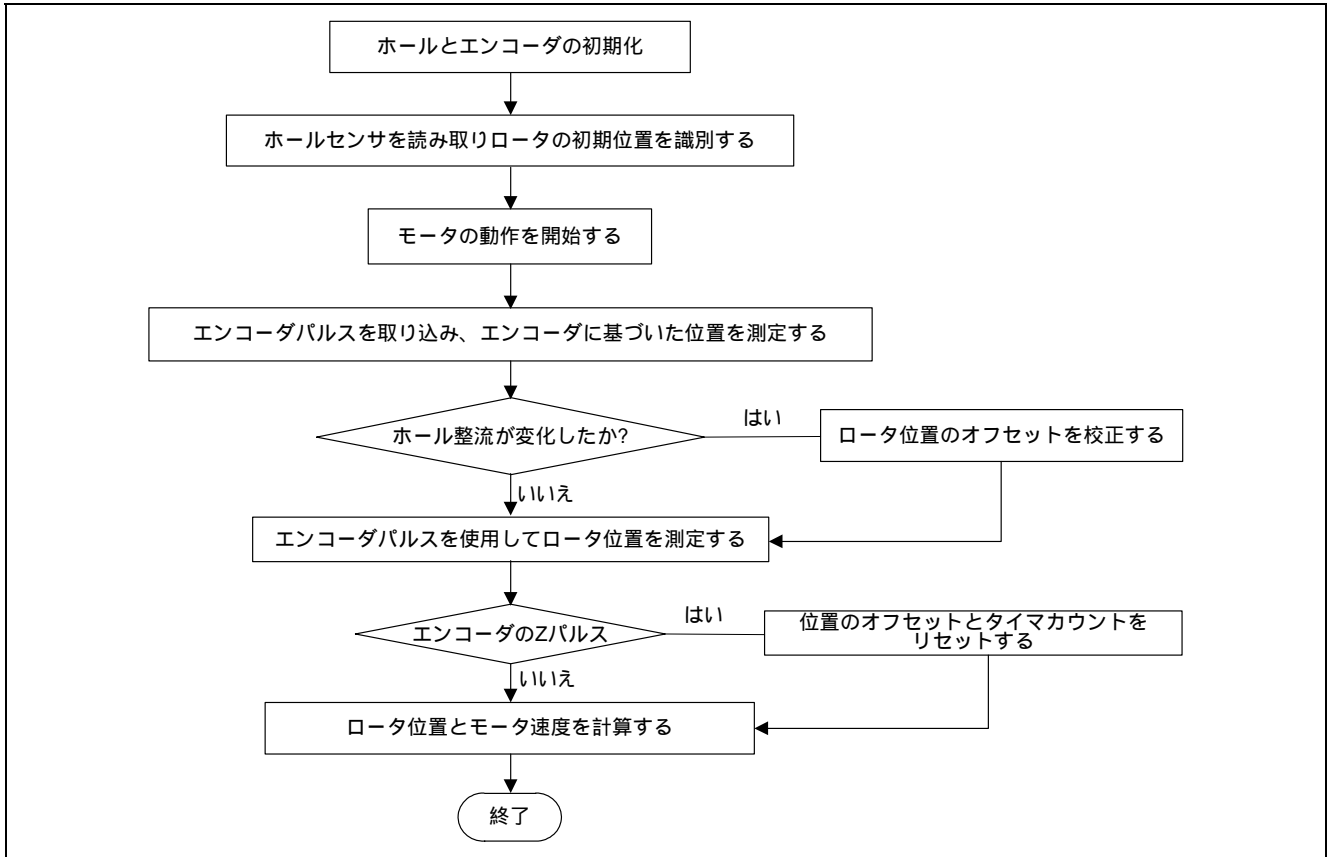


図 16 エンコーダ計数モード動作での位置と速度の測定のフローチャート

7.4 位置制御に対する PWM 割り込み

位置プロファイルの生成と位置制御は、16kHz の搬送周波数で PWM 割り込みに挿入されます。図 17 は、PWM 割り込みのフローチャートです。

MC_ConInt () の PWM 割り込みの手順は次のとおりです。

- モータの相電流と DC バス電圧を測定する
- ホールセンサとエンコーダを使用してモータの位置と速度を計算する
- モータ電流を dq 電流に転送する
- 電流制御ループ
- 軌跡ジェネレータと位置プロファイルを更新する
- 位置制御ループ
- 空間ベクトル PWM 変調または正弦波 PWM 変調を使用した PWM 生成

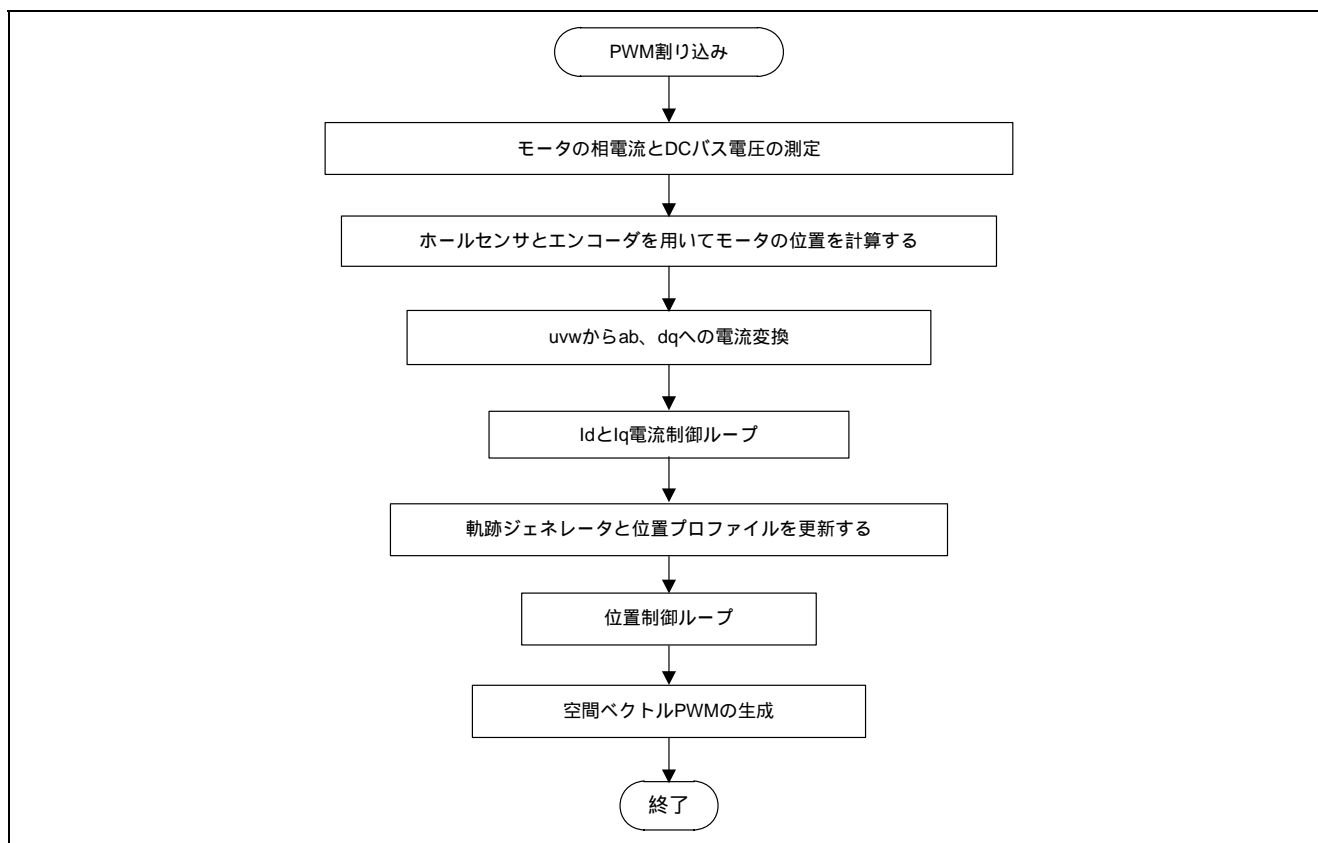


図 17 位置制御に対する PWM 割り込みのフローチャート

8. モータと位置制御のパラメータ

8.1 ヘッドファイルによるチューニング

モータのデータシートおよび位置制御要件に従って、モータと制御のパラメータおよび動作プロファイルを正しくチューニングする必要があります。

「customize.h」のコードで必要なモータと制御のパラメータを以下に示します。

- #define ENC_EDGES_CUSTOM 4000 // エンコーダの全エッジ / 分解能
- #define PWM_FREQ_CUSTOM 16000 // PWM 周波数 (Hz)
- #define SAM_FREQ_CUSTOM 16000 // サンプリング周波数 (Hz)
- #define C_POLI_CUSTOM 4 // 極のペア数
- #define R_STA_CUSTOM 8 // ステータ相の抵抗 (オーム) / OHM_DIV
- #define L_SYN_CUSTOM 10 // 同期インダクタンス (ヘンリー) / HEN_DIV
- #define POS_MIN_CUSTOM 0 // 最小位置 (カウント)
- #define POS_MAX_CUSTOM 40000 // 最大位置 (カウント)
- #define KP_CUR_CUSTOM 60 // K 比例電流の制御
- #define KI_CUR_CUSTOM 80 // K 積分電流の制御
- #define K_P_POSITION 10 // K 比例位置制御
- #define K_I_POSITION 12 // K 積分位置制御
- #define K_D_POSITION 150 // K 微分位置制御

8.2 GUI による操作

モータと制御のパラメータは、図 18 に示すルネサスの使いやすいグラフィカルユーザインターフェースを用いてチューニングすることができます。コードを修正しなくても、さまざまなモータとアプリケーションに合わせてパラメータを設定することができます。パラメータウィンドウによって 20 のパラメータをセットアップすることができます。これらのパラメータを上下にスクロールして設定の変更を行い、EEPROM に「書き込む」ことができますが、これによって「customize.h」ファイルが変更されることはありません。リセットによって元の値が復元されます。図 19 から分かるように、これらのパラメータは「customize.h」ファイルの各#define を反映しています。モータと制御のパラメータは GUI によって簡単に変更できます。

一方、GUI には、指令位置を設定し、またモータの実際の動作ステータスを表示するための位置制御ウィンドウがあります。



図 18 評価キットの GUI インターフェース

INDEX	DESCRIPTION	UNIT	MIN	MAX	VALUE	VALID
1	00. Default Parameters Setting	-	0	32767	0	true
2	01. Minimum Speed	rpm	200	5000	500	true
3	02. Maximum Speed	rpm	1000	20000	2500	true
4	03. Acceleration	rpm/s	1	10000	1000	true
5	04. Deceleration	rpm/s	1	10000	1000	true
6	05. Polar couples	-	1	5	5	true
7	06. Startup Current	Apk/10	0	5000	10	true
8	07. Maximum "q" Current	Apk/10	0	5000	20	true
9	08. Stator Resistance	Ohm/10	0	5000	17	true
10	09. Synchronous Inductance	Henry/10000	0	5000	12	true
11	10. Startup Time	ms	300	10000	1000	true
12	11. Current Loop Kp	-	0	2047	60	true
13	12. Current Loop Ki	-	0	1023	80	true
14	13. Speed Loop Kp	-	0	4095	10	true
15	14. Speed Loop Ki	-	0	4095	100	true
16	15. Startup offset V	V/10	0	32767	0	true
17	16. Startup delta V	V/10	0	32767	0	true
18	17. PI Tuning trigger	-	0	32767	0	true
19	18. Free	-	0	32767	0	true
20	19. Free	-	0	32767	0	true

図 19 パラメータウィンドウ

Appendix A - References

1. RX62T Group User's Manual: Hardware, R01UH0034EJ0110, April 20, 2011
2. DevCon 2010 Courses:
 - ID-620C, Complete Motor Control Integration with RX62T.
 - ID 623C, Understanding Sensor-less Vector Control with Floating Point Unit (FPU) Implementation.
3. DevCon 2008 Courses:
 - ID-504, Speed Control using a Digital Encoder and Vector Formulation
4. Application Note of Sensorless Vector Control of three-phase PMSM motors, REU05B0103-0100/Rev.1.00, March, 2009
5. Application Note of Mcrp05: Brushless AC Motor Reference Platform, REU05B0051-0100, Feb, 2009

ホームページとサポート窓口

ルネサス エレクトロニクスホームページ

<http://japan.renesas.com/>

お問い合わせ先

<http://japan.renesas.com/inquiry>

すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2013.02.08	—	初版発行

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本ドキュメントおよびテクニカルアップデートを参照してください。

1. 未使用端子の処理

【注意】未使用端子は、本文の「未使用端子の処理」に従って処理してください。

CMOS 製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハイインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI 周辺のノイズが印加され、LSI 内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。未使用端子は、本文「未使用端子の処理」で説明する指示に従い処理してください。

2. 電源投入時の処置

【注意】電源投入時は、製品の状態は不定です。

電源投入時には、LSI の内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。

外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。

同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

3. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止

【注意】リザーブアドレス（予約領域）のアクセスを禁止します。

アドレス領域には、将来の機能拡張用に割り付けられているリザーブアドレス（予約領域）があります。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。

4. クロックについて

【注意】リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。

プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。

リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。

5. 製品間の相違について

【注意】型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。

同じグループのマイコンでも型名が違うと、内部 ROM、レイアウトパターンの相違などにより、電気的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ輻射量などが異なる場合があります。型名が違う製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

- 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器・システムの設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因して、お客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
- 本資料に記載されている情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、誤りがないことを保証するものではありません。万一、本資料に記載されている情報の誤りに起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社は、一切その責任を負いません。
- 本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害に関し、当社は、何らの責任を負うものではありません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
- 当社製品を改造、改変、複製等しないでください。かかる改造、改変、複製等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
- 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。
標準水準： コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、
家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、
防災・防犯装置、各種安全装置等
当社製品は、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（原子力制御システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、使用することはできません。たとえ、意図しない用途に当社製品を使用したことによりお客様または第三者に損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。なお、ご不明点がある場合は、当社営業にお問い合わせください。
- 当社製品をご使用の際は、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他の保証範囲内でご使用ください。当社保証範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
- 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は耐放射線設計については行っておりません。当社製品の故障または誤動作が生じた場合も、人身事故、火災事故、社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
- 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制するRoHS指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
- 本資料に記載されている当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。また、当社製品および技術を大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的その他軍事用途に使用しないでください。当社製品または技術を輸出する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他輸出関連法令を遵守し、かかる法令の定めるところにより必要な手続を行ってください。
- お客様の転売等により、本ご注意書き記載の諸条件に抵触して当社製品が使用され、その使用から損害が生じた場合、当社は何らの責任も負わず、お客様にてご負担して頂きますのでご了承ください。
- 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。

注1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社とその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいいます。

注2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注1において定義された当社の開発、製造製品をいいます。



ルネサス エレクトロニクス株式会社

■営業お問合せ窓口

<http://www.renesas.com>

*営業お問合せ窓口の住所・電話番号は変更になることがあります。最新情報につきましては、弊社ホームページをご覧ください。

ルネサス エレクトロニクス販売株式会社 〒100-0004 千代田区大手町2-6-2（日本ビル）

(03)5201-5307

■技術的なお問合せおよび資料のご請求は下記へどうぞ。

総合お問合せ窓口：<http://japan.renesas.com/contact/>