PM モータのセンサレスベクトル制御

Renesas Flexible Motor Control シリーズ用　フライングスタート機能搭載

要旨

本サンプルプログラムは、RA ファミリ/RX26T CPU ボードと Renesas Flexible Motor Control Kit 向けの PM センサレスベクトル制御機能および、家電・産業向けに使用される以下の機能を実装する制御アルゴリズムを提供しています。

・停止・低速運転時 オープンループ始動（電流引き込み制御）

・中高速域運転時 誘起電圧オブザーバによる PM センサレスベクトル制御

・弱め磁束制御および最大トルク・電流制御（MTPA[1]）

・トルク振動抑制機能、脱調検出、フライングスタート（拾い込み制御）

図 1-1 に、本サンプルプログラムで使用するハードウェア構成図を示します。

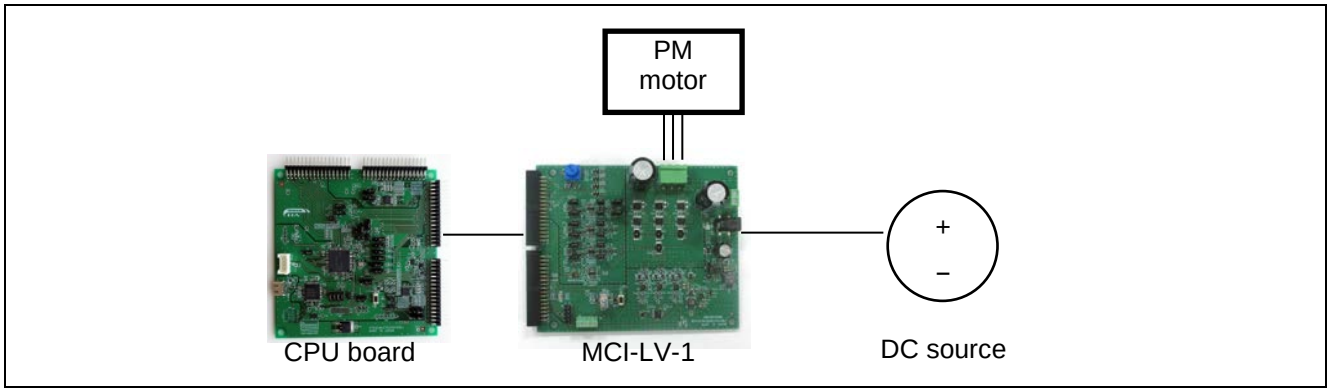


図 1-1　ハードウェア構成図

本アプリケーションノートで提供するサンプルプログラムは評価用途であり、弊社が本サンプルプログラムの動作を保証するものではありません。本サンプルプログラムを使用する場合、適切な環境で十分な評価をした上でご使用ください。

動作確認デバイス

本アプリケーションノート対象ソフトウェアの動作確認は下記のデバイスで行っています

・ RA6T2 (R7FA6T2BD3CFP)
・RA6T3 (R7FA6T3BB3CFM)
・RA4T1 (R7FA4T1BB3CFM)
・RA8T1 (R7FA8T1AHECBD)
・RA8T2 (R7KA8T2LFLCAC)
・RX26T RAM64KB ver (R5F526TFCDFP)
・RX26T RAM48KB ver (R5F526TACDFM)

[1] MTPA 機能は IPMSM(埋込型永久磁石同期電動機)のみに使用可能です。SPMSM には使用できません。

目次

1. はじめに 6

2. 用語集 9

3. 使用機材・使用ソフトウェア 10
3.1 使用ハードウェアの一覧 10
3.2 使用ソフトウェアの一覧 11

4. ハードウェア環境構築方法 12
4.1 ハードウェア環境の概要 12
4.2 電源の準備 12
4.3 モータの準備 12
4.4 負荷機の準備 13
4.5 インバータの準備 13
4.6 RA ファミリ CPU ボードのセットアップ 14
4.7 RX26T CPU ボードのセットアップ 17
4.8 キットの接続例 18
4.9 オンボードデバッガ 18
4.10 配線方法 18
4.11 測定器の利用 20

5. ソフトウェア環境構築方法 21
5.1 RA ファミリ MCU で e² studio を使用する場合 21
5.2 RX26T MCU で e² studio を使用する場合 21
5.3 RX26T MCU で CS+ を使用する場合 21

6. 運転方法 22
6.1 運転前の注意点 22
6.2 運転までの手順 22
6.3 接続方法 23
6.4 サンプルプログラムの書き込み 28
6.4.1 RA ファミリ MCU・RX26T MCU 用の e² studio のインストール 28
6.4.2 e² studio へのプロジェクトのインポート 28
6.4.3 e² studio でのプロジェクトのビルド 32
6.4.4 PC とターゲット CPU ボードを USB ケーブルで接続 34
6.4.5 ターゲットボードへの書き込み(ビルド済み) 35
6.5 RMW の導入方法 37
6.6 Map ファイルの登録更新 38
6.7 RMW の操作に使用する変数 39
6.8 操作方法 42
6.9 モータ停止・遮断方法 45

7. モータ制御アルゴリズム 46
7.1 概要 46

7.2 制御ブロック図 47
7.3 速度制御機能 48
7.4 最大トルク/電流制御(MTPA) 48
7.5 弱め磁束制御 48
7.6 電流制御機能 50
7.7 非干渉制御 50
7.8 脱調検出 51
7.9 トルク振動抑制 51
7.9.1 概要 51
7.9.2 原理 51
7.9.3 繰り返し制御器のマイコンへの実装 52
(a) テーブル参照方式（LUT） 53
(b) 多項式近似方式（PAT） 53
7.9.4 進み補償 54
7.9.5 学習機能 54
7.10 フライングスタート 57
7.11 センサレス機能 60
7.11.1 概要 60
7.11.2 電流引き込み制御（OpenLoop） 60
7.11.3 中高速域センサレスアルゴリズム 61
7.12 サンプルディレイ補償 61
7.13 電圧誤差補償 61
7.14 PWM 変調方式 62

8. ハードウェア仕様 63
8.1 ユーザインタフェース 63
8.2 周辺機能 65

9. ソフトウェア仕様・構成 67
9.1 ソフトウェア仕様 67
9.2 ソフトウェア全体構造 68
9.3 タスクの説明 69
9.4 ファイル・フォルダ構成 70
9.5 アプリケーション層 74
9.5.1 機能 74
9.5.2 構造体・変数情報 74
9.5.3 マクロ定義 76
9.5.4 パラメータ調整・設定 76
9.6 システムマネージャ 77
9.6.1 機能 77
9.6.2 モジュール構成図 77
9.7 モータマネージャ 78
9.7.1 機能 78
9.7.2 モジュール構成図 79
9.7.3 モード管理 80
9.7.4 シーケンスの説明 81
9.7.5 始動シーケンス 82

9.7.6 保護機能 83
9.7.7 API 84
9.7.8 構造体・変数情報 87
9.7.9 マクロ定義 95

10. パラメータの設定 97
10.1 概要 97
10.2 MCU 関連パラメータ 97
10.3 制御機能の設定パラメータの一覧 99
10.4 保護関連パラメータ 100
10.5 モータ制御用 PWM キャリア周波数の変更 100
10.6 パルス変調方法の設定 101
10.7 インバータパラメータ 102
10.7.1 概要 102
10.7.2 電流検出ゲイン 103
10.7.3 電圧検出ゲイン 104
10.7.4 電圧誤差補償パラメータ 105
10.8 モータパラメータ 106
10.9 電流制御パラメータ 109
10.10 最大トルク/電流制御 109
10.11 速度制御パラメータ 110
10.12 サンプルディレイ補償パラメータ 111
10.13 センサレス制御パラメータ 112
10.14 弱め磁束制御パラメータ 114
10.15 フライングスタートパラメータ 114
10.16 トルク振動抑制パラメータ 116
10.17 脱調検出パラメータ 119

11. FSP 設定(RA ファミリ MCU 用) 120
11.1 FSP の概要 120
11.2 FSP スタック設定 120
11.3 コールバック・割り込み 121
11.4 端子設定 122
11.5 3 相 PWM GPT 設定 126
11.6 AGT0 設定(速度制御周期設定) 128
11.7 ADC 設定 129
11.8 POEG 設定 136
11.9 ELC 設定 136
11.10 IWDT 設定 137

12. Smart Configurator 設定(RX26T 用) 139
12.1 SC の概要 139
12.2 クロック設定 139
12.3 コンポーネント設定 140
12.4 AD 設定 141
12.5 CMT 設定 141
12.6 GPT 設定 141

12.7 POEG 設定 142
12.8 IWDT 設定 143
12.9 割り込み設定 143
12.10 端子設定 144

13. 評価結果 145
13.1 モータ制御評価 145
13.1.1 始動から閉ループ速度制御への移行 145
13.1.2 負荷特性 145
13.1.3 フライングスタート 146
13.2 CPU 使用率 147
13.3 プログラムサイズ・RAM 使用量 148

14. FAQ 149

1. はじめに

本アプリケーションノートはルネサス製マイクロコントローラ (MCU) である RA ファミリまたは RX26T、およびルネサス製インバータボード MCI-LV-1 を使用し、永久磁石同期モータをセンサレスベクトル制御で駆動するサンプルプログラムの使用方法及びソフトウェアの構造・仕様・制御方法について説明することを目的としています。

ルネサス製インバータ MCI-LV-1 のセットアップ、使用方法、動作については、MCI-LV-1 ユーザーズマニュアル (R12UZ0092) を参照ください。

サンプルプログラムは、ルネサス製 RA ファミリ CPU ボードまたは RX26T CPU ボードと、ルネサス製インバータ MCI-LV-1 を用いて、ブラシレス DC モータ R42BLD30L3 (MOONS' 製) を、センサレスでモータ制御することができます。また、モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」に対応しており MCU の内部データ確認や、モータ制御のユーザインタフェース(UI)として使用可能です。サンプルプログラムの MCU 機能割り当てや、制御の割り込み負荷状況などを参照頂くことで、使用する MCU の選定やソフトウェア開発の参考としてご活用ください。

本アプリケーションノートは、本書内で記載している PM モータ・インバータ環境で開発・評価を行ったものであり、ユーザの使用する PM モータやインバータ環境で動作することを保証するものではありません。電流センサ自体や、信号経路の基板パターン設計、サンプリング・分解能・フィルタの仕様やモータの磁気飽和特性・個体差により、センサレス制御性能に制約が生じる場合があります。ユーザの責任の下で、アルゴリズムの改良や、パラメータのチューニングが必要となります。

本アプリケーションノートで記載している機材・機器については、各機器メーカーによる廃盤や改訂等により入手できない場合があります。予めご了承ください。

評価に使用した主な装置・機器

インバータ：ルネサス製　インバータ MCI-LV-1
モータ： R42BLD30L3 (MOONS' 製)

対象ソフトウェア

本アプリケーションノート対象ソフトウェアを下記に示します。

・RA6T2_MCB2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V101（IDE：e² studio版）
・RA6T3_MCB2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V100（IDE：e² studio版）
・RA4T1_MCB2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V100（IDE：e² studio版）
・RA8T1_MCB_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V101（IDE：e² studio版）
・RA8T2_MCB_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V101（IDE：e² studio版）
・RX26T_MCBA2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V101（IDE：e² studio版）
・RX26T_MCBC2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_E2S_V100 （IDE：e² studio版）
・RX26T_MCBA2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_CSP_V101（IDE：CS+版）
・RX26T_MCBC2_MCILV1_PM_LESS_FOC_WFS_CSP_V100（IDE：CS+版）

参考資料

・RA6T2 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0951）
・RA6T3 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0998）
・RA4T1 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0999）
・RA8T1 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH1016）
・RA8T2 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH1067）
・RX26T グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0979）
・RA Flexible Software Package Documentation (Release v6.5.0)
・スマート・コンフィグレータ ユーザーズマニュアル: RX API リファレンス編（R20UT4360）
・スマート・コンフィグレータ ユーザーズガイド: e² studio 編（R20AN0451）

・スマート・コンフィグレータ ユーザーズガイド: CS+編（R20AN0470）
・Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル（R21UZ0004）
・MCB-RA6T2 ユーザーズマニュアル（R12UZ0099）
・MCB-RA6T3 ユーザーズマニュアル（R12UZ0116）
・MCB-RA4T1 ユーザーズマニュアル（R12UZ0117）
・MCB-RA8T1 ユーザーズマニュアル（R12UZ0134）
・MCB-RA8T2 ユーザーズマニュアル（R12UZ0172）
・MCB-RX26T Type A ユーザーズマニュアル（R12UZ0112）
・MCB-RX26T Type C ユーザーズマニュアル （R12UZ0127）
・MCI-LV-1 ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R12UZ0092）

本アプリケーションノートを使用いただく際に、よく確認される内容について、対応する章を以下にまとめています。

表 1-1 確認したい内容と対応章の一覧

確認したい内容	対応する章
必要な機材を確認・選定する	3
電源を選定する	4.2
モータを選定する	4.3
インバータを選定する	4.5
配線を確認する	4.10
サンプルプログラムの開発環境を準備する	5
マイコンにサンプルプログラムを書き込む	6.3, 6.4
PC にモータを運転するソフトウェアを導入する	6.5
サンプルプログラムを変更した後、RMW に変更点を反映する	6.6
サンプルプログラムの内部情報を PC 上で確認する	6.7
モータを運転する	6.8
運転中のモータを停止する	6.9
モータ制御アルゴリズムを調べる	7
サンプルプログラムの構造を調べる	9
インバータパラメータを確認、変更する	10.7,10.4, 11.8, 11.4
モータパラメータを確認、変更する	10.8, 10.4
モータ制御の PWM キャリア周波数の変更	10.5
センサレスの設定を変更したい	10.13
マイコンの設定を変更したい	10.2, 11, 12
よくある質問を確認する トラブルが起きた場合の対応を確認したい	14

2. 用語集

本書で使用されている主な用語とその説明を以下に示します。

表 2-1 用語集

用語	説明
IDE	統合開発環境のこと。e² studio 等を指します。
IPM モータ	IPMSM とも呼ばれ、回転子に磁石が埋め込まれており、効率や小型、コスト面で優位とされています。突極性があり、Ld と Lq が異なります。
MC-COM	波形表示用の接続治具・ツールのことを示します。詳細は、以下の URL を参照ください。 https://www.renesas.com/ja/design-resources/boards-kits/mc-com
RMW	Renesas Motor Workbench と呼ばれる、モータ制御に特化した操作ソフトウェアのこと。
SPM モータ	SPMSM とも呼ばれる。低速でも滑らかな動きが要求される、サーボモータに使用されます。
salient PMSM	PM モータのこと。
インバータ母線電圧	インバータ回路に入力される直流電圧のこと。直流中間電圧とも呼ばれる。
エミュレータ	MCU に書き込むための装置のこと。ICE とも呼ばれます。
オープンループ	位置のフィードバック信号なしで、電圧制御を行います。モータ制御方式の一種のこと。
スタック	FSP で生成された、MCU 周辺機能を使用しやすくするドライバモジュールのこと。
センサレス	「磁極位置センサや速度センサがないこと」を示します。
フィードバック制御	電流検出や、速度検出で得られるフィードバック信号を用いて制御する方式のこと。
埋込磁石型同期モータ	IPMSM または IPM モータのこと
表面磁石型同期モータ	SPMSM または SPM モータのこと
電気角	モータに流れる出力電流の位相角度のこと。モータの極対数で割ると、機械角に換算できる。
機械角	モータ軸の回転角度のこと。軸が 1 分に 1 回転で 1r/min となります。
FSP	Flexible Software Package の略で、ルネサスのマイクロコントローラ RA ファミリ MCU を用いた組み込みシステム向けのソフトウエアパッケージ。
SC	Smart Configurator の略で、マイコン（特に RX）の初期設定プログラムを自動で生成することができるツールです。

3. 使用機材・使用ソフトウェア

3.1 使用ハードウェアの一覧

本サンプルプログラムの評価に使用した機器の一覧を以下に示します。

表 3-1 使用機器一覧

機器	メーカー	型式
RA6T2 CPU ボード MCB-RA6T2 Version 2 	Renesas	RTK0EMA270C00002BJ *1 MCU 型式 RA6T2, R7FA6T2BD3CFP
RA6T3 CPU ボード MCB-RA6T3 Version 2 	Renesas	RTK0EMA330C00001BJ MCU 型式 RA6T3, R7FA6T3BB3CFM
RA4T1 CPU ボード MCB-RA4T1 Version 2 	Renesas	RTK0EMA430C00001BJ MCU 型式 RA4T1, R7FA4T1BB3CFM
RA8T1 CPU ボード MCB-RA8T1 	Renesas	RTK0EMA5K0C00000BJ MCU 型式 RA8T1, R7FA8T1AHECBD
RA8T2 CPU ボード MCB-RA8T2 	Renesas	RTK0EMA6L0C00000BJ MCU 型式 RA8T2, R7KA8T2LFLCAC
RX26T CPU ボード MCB-RX26T Type A Version 2 	Renesas	RTK0EMXE70C00001BJ MCU 形式 RX26T RAM64KB 版, R5F526TFCDFP
RX26T CPU ボード MCB-RX26T Type C Version 2 	Renesas	RTK0EMXE30C00001BJ MCU 型式 RX26T RAM48KB 版, R5F526TACDFM

インバータボード 	Renesas	MCI-LV-1 RTK0EM0000B12020BJ
絶縁型通信ボード MC-COM 	Renesas	Renesas Flexible Motor Control Communication Board RTK0EMXC90S00000BJ
PM モータ	MOONS’	R42BLD30L3
DC 電源装置	菊水電子工業	PCR1000MS
トルクメータ・負荷機	MAGTROL	DSP6001

【注】 1. RTK0EMA270C00000BJ は非対応ですのでご注意ください。

3.2 使用ソフトウェアの一覧

本サンプルプログラムの評価で使用したソフトウェアと、そのバージョンを以下に示します。本サンプルプログラムは、弊社開発環境である e^2 studio および CS+評価版で、ご利用いただけます。

表 3-2 使用ソフトウェアー覧 (RA ファミリを使用する場合)

メーカー	ソフトウェア	バージョン	備考
Renesas	e^2 studio	2026-04.2	無償版
Renesas	FSP	V6.5.0	
GNU	GNU ARM Embedded	13.2.1.arm-13-7	
Renesas	Renesas Motor Workbench	3.3.1	

表 3-3 使用ソフトウェアー覧 (RX26T を使用する場合)

メーカー	ソフトウェア	バージョン	備考
Renesas	e^2 studio	2026-04.2	無償版
Renesas	CS+ for CC	V8.15.00	無償版
Renesas	RX スマート・コンフィグレータ	V2.29.0	
Renesas	CC-RX	V3.07.00	無償評価版
Renesas	Renesas Motor Workbench	3.3.1	

4. ハードウェア環境構築方法

4.1 ハードウェア環境の概要

本サンプルプログラムを使用し、PM モータを動かすためのハードウェア環境について説明します。図 4-1 に、ハードウェア構成例を示します。

電源 (4.2)と、モータ及び負荷機 (4.3、4.4)、インバータ (4.5), CPU ボード及びモニタリング・書き込み装置 (4.6)について、詳細を次の項から説明します。

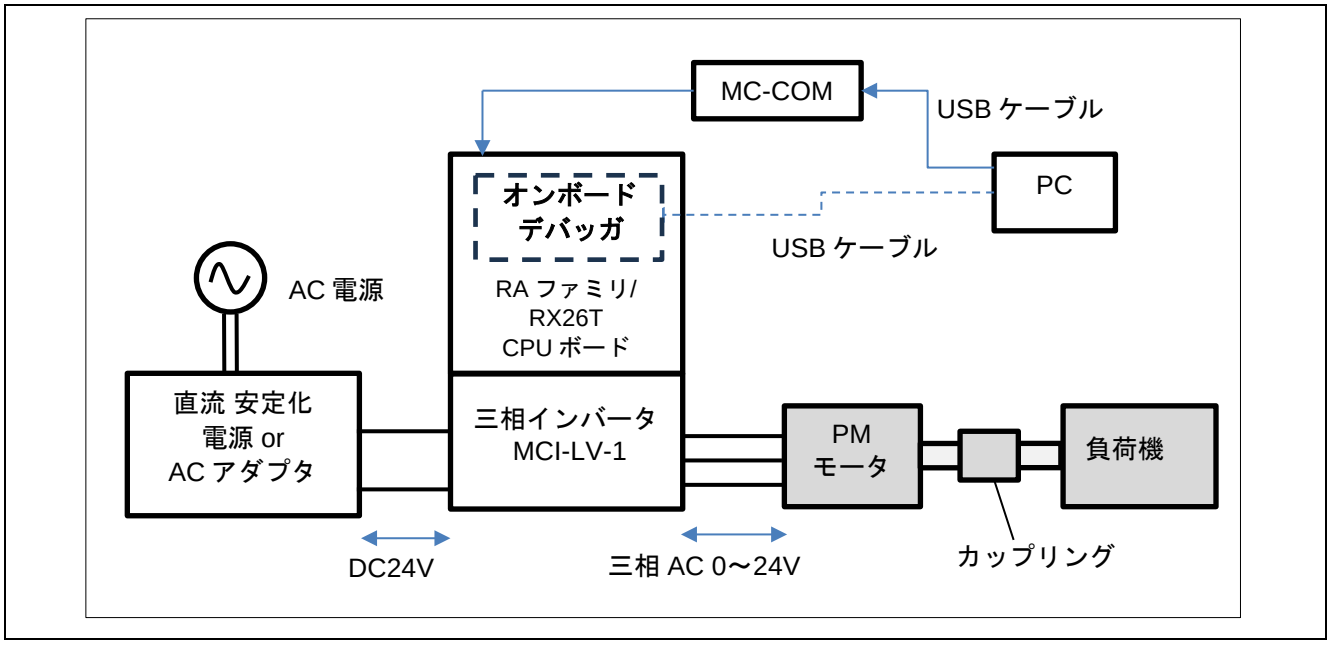


図 4-1 ハードウェア構成例

4.2 電源の準備

本サンプルプログラムでは、三相インバータ MCI-LV-1 への DC24V 供給に、直流安定化電源や AC アダプタ、制御電源（24V、2.5A 以上出力可能なもの）を使用します。

インバータに供給する電圧は、使用するモータの誘起電圧や定格条件、最大負荷条件によって変わります。ユーザの実験環境や、使用する AC 電源の制約や条件に応じて、電源の種類を適切に選定してください。

ここで使用されているインバータは最大 10A の電流出力が可能です。モータを変更した場合、変更後のモータの定格により、定格運転ができなくなることがありますのでご注意ください。

4.3 モータの準備

インバータとモータの配線を行います。事前に、センサレスベクトル制御で動かすために必要となる、PM モータのパラメータ・定数を LCR メータ等の測定器などを用いて取得してください。また必要に応じて、PM モータのメーカーにパラメータの情報を得るために問い合わせをしてください。

モータパラメータを変更した場合、電流調節器や速度調節器、センサレス制御のパラメータを、モータに合わせて変更を行います。

- 定格値（電流、電圧、速度、極対数）
- Ld、Lq、抵抗値
- 誘起電圧、鎖交磁束
- モータ及びモータの軸に繋がっている負荷装置のイナーシャ（慣性モーメント）

弊社で調査を行った、MOONS' 製モータ R42BLD30L3 のモータパラメータを表 4-1 に示します。弊社で独自に測定したものであり、得られるパラメータには測定条件によるばらつきや個体差があります。このパラメータは、正確性や性能を保証するものではありません。また、負荷電流によって生じる磁気飽和現象により、運転中にモータパラメータの値が変化し、位置推定精度や運転性能に影響する場合があります。

表 4-1　MOONS' 製 R42BLD30L3 モータパラメータ（一部、弊社独自測定によるもの）

一次抵抗 R	1.32Ω
d 軸インダクタンス	2.1mH
q 軸インダクタンス	2.1mH
慣性モーメント	0.0000032 kgm^2
磁束鎖交数Ψ	0.0115Wb(rms)
極対数	4（極数 8）
定格速度	4000r/min
最高速度	4500r/min
定格トルク・最大トルク	0.08 Nm・0.16 Nm
定格周波数	266.67Hz(電気角) , 66.67Hz(機械角)
定格電圧	36V
定格電流	1.13Arms
定格出力	30 W

4.4　負荷機の準備

インバータ・モータ制御の評価のためには、出力特性を取得する必要があるため、負荷機が必要です。負荷機はユーザ自身でご用意ください。評価対象のモータに接続するタイプの負荷機を選定し、カップリングを行ってください。この時、トルクと速度を測定可能なトルク・速度計を負荷機のモータとの間に設置し、正確なトルク・速度特性が得られるようにしてください。

連続試験を行う場合には、供試機インバータに帰還するように回生動作が可能な負荷試験装置を使用することを推奨します。パウダーブレーキやヒステリシスブレーキを用いた負荷試験装置を使用する場合には、連続運転の制約などを確認の上、使用ください。

4.5　インバータの準備

インバータを準備される際に、以下の情報を確認してください。本サンプルプログラムでは、インバータボード MCI-LV-1 に合わせた設定となっており、別のインバータを使用する場合は設定を変更してください。

センサレスベクトル制御の制御性能は、電流センサから入力される電流検出値を用いて、磁極位置を推定するため、センサ自体の性能や、センサから出力される信号の経路となる回路のばらつき・精度に、大きく影響されます。インバータの選定や設計には、十分に配慮を行ってください。

- 定格容量(kVA)
- デッドタイム値(us)
- 電流センサの種類、特性、信号仕様

- 電流センサのゲイン値及びオフセット値、電流と電圧の関係性や信号の直線性の特性データ等
- 電圧センサのゲイン値及びオフセット値、信号の直線性の特性データ等

また、MCI-LV-1 はボードユーザインタフェース（ボード UI）を搭載しており、ユーザはそれらを使ってモータ制御指令を操作することができます。ボードユーザインタフェースとその機能を表 4-2 に示します。

表 4-2　ボードユーザインタフェースと機能一覧

項目	インタフェース	機能
回転位置・速度	ボリューム 抵抗 (VR1)	回転速度指令値入力（アナログ値）
START/STOP	トグルスイッチ (SW1)	モータ回転開始/停止指令
ERROR RESET	プッシュスイッチ (SW2)	エラー状態からの復帰指令（エラー発生時）
LED1	オレンジ色 LED	モータ回転時：点灯 停止時：消灯
LED2	オレンジ色 LED	エラー検出時：点灯 通常動作時：消灯
RESET	プッシュスイッチ (RESET1)	システムリセット

4.6　RA ファミリ CPU ボードのセットアップ

MCI-LV-1 に直接差し込むことができる、RA ファミリ CPU ボードの装着方法について説明します。図 4-2 から図 4-8 にある「インバータボードコネクタ（INV1 用）もしくは「インバータコネクタ」に、MCI-LV-1 の「CPU ボードコネクタ」を差し込んでください。

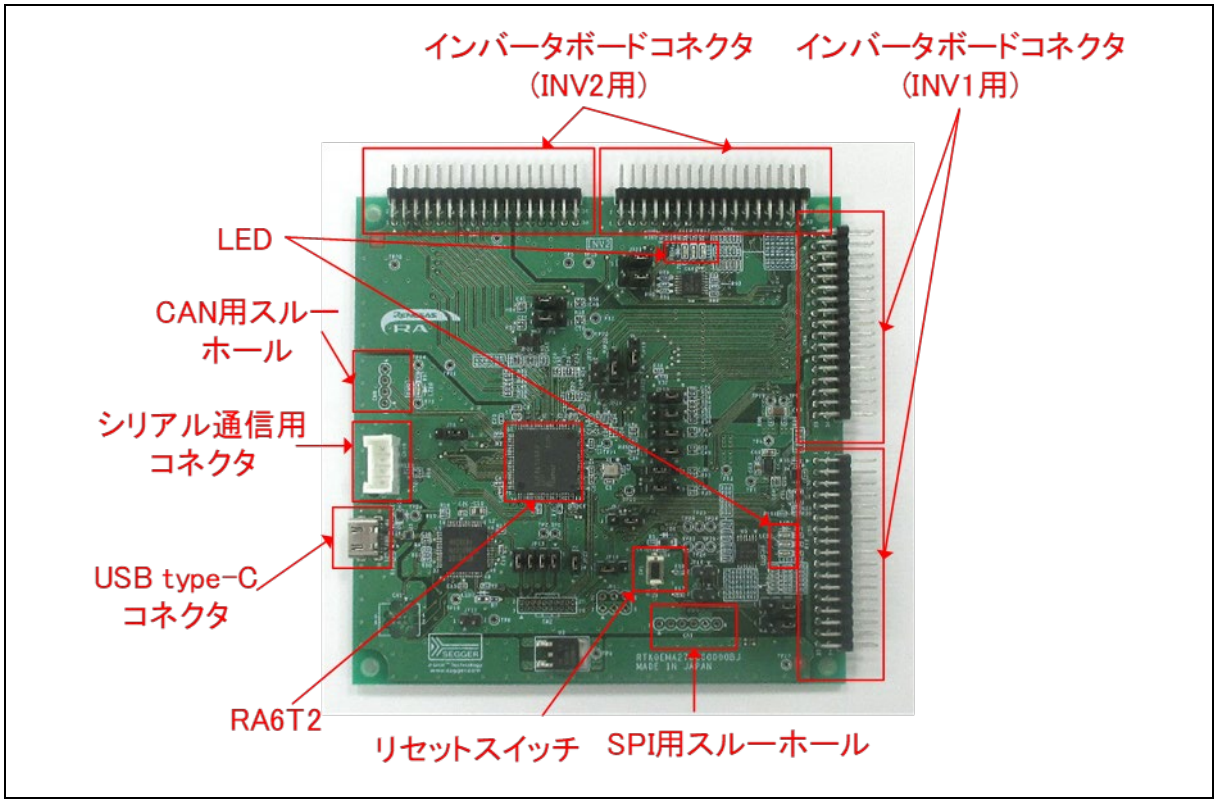


図 4-2　RA6T2 CPU ボードとインタフェース

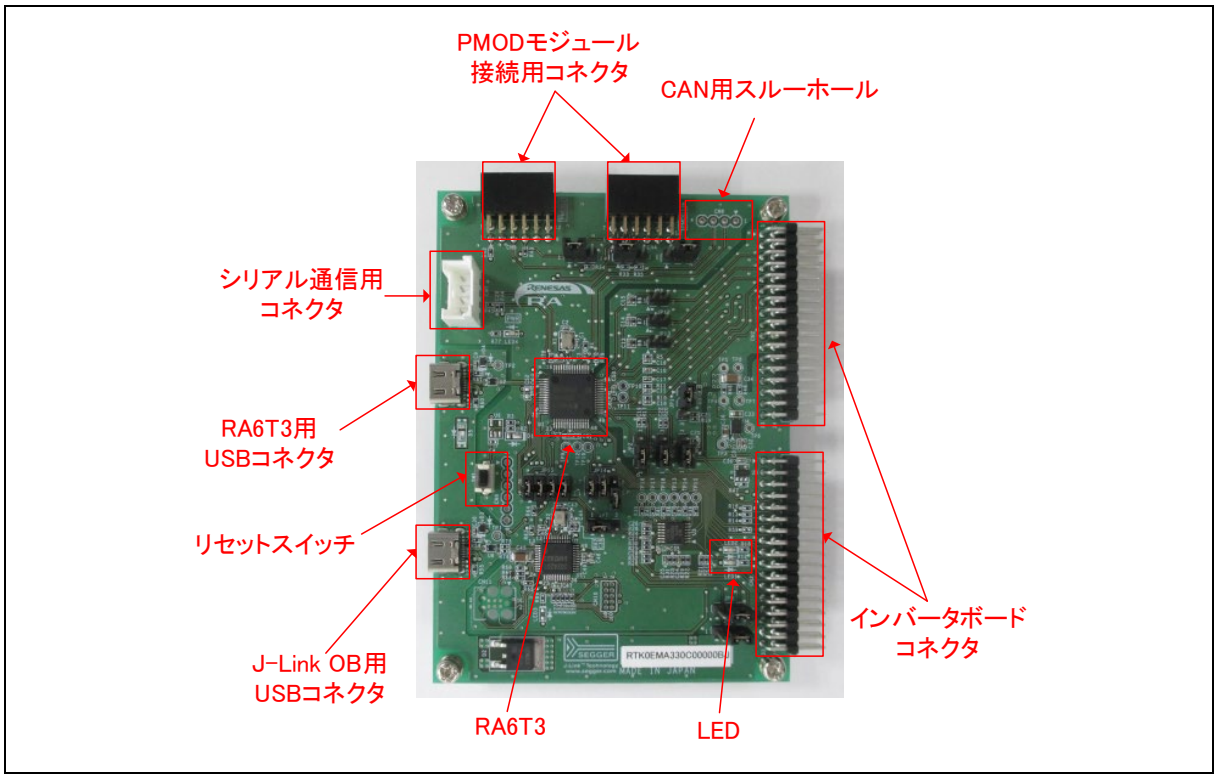


図 4-3 RA6T3 CPU ボードとインタフェース

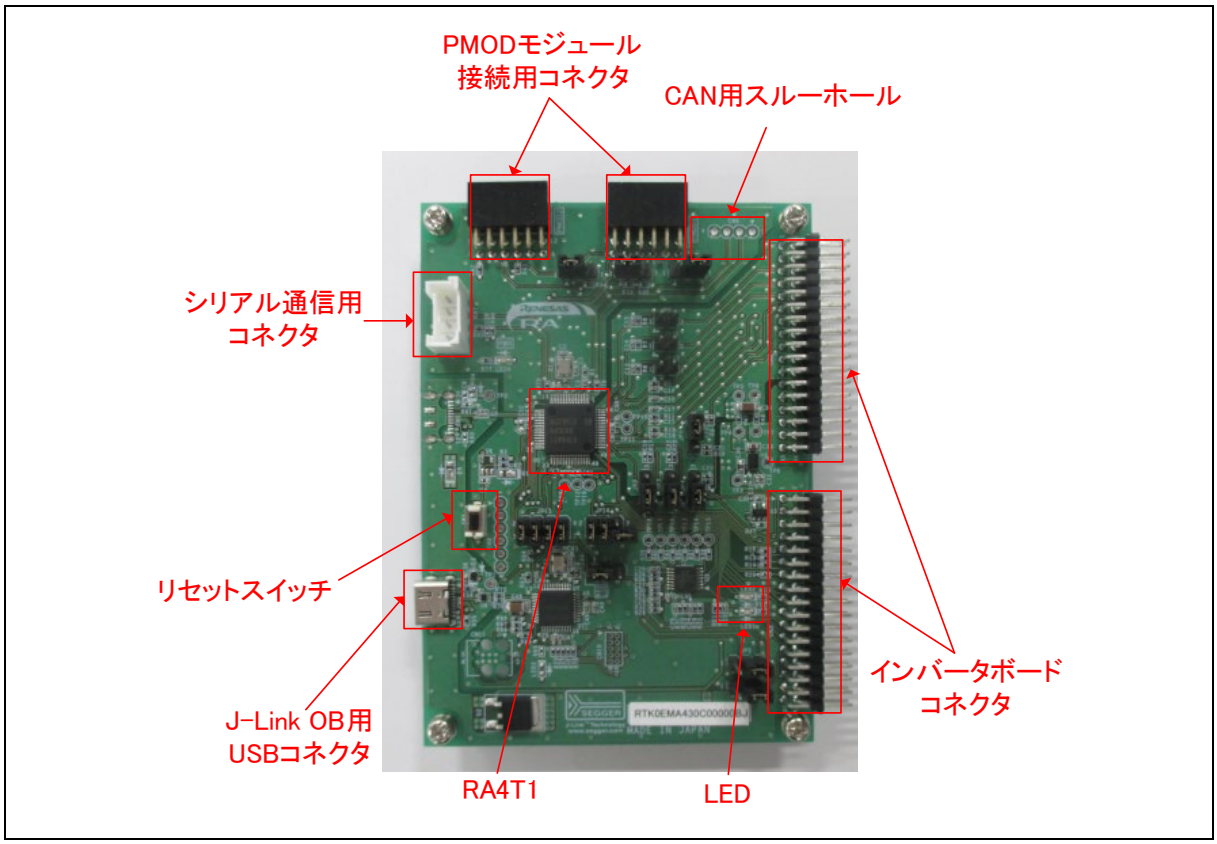


図 4-4 RA4T1 CPU ボードとインタフェース

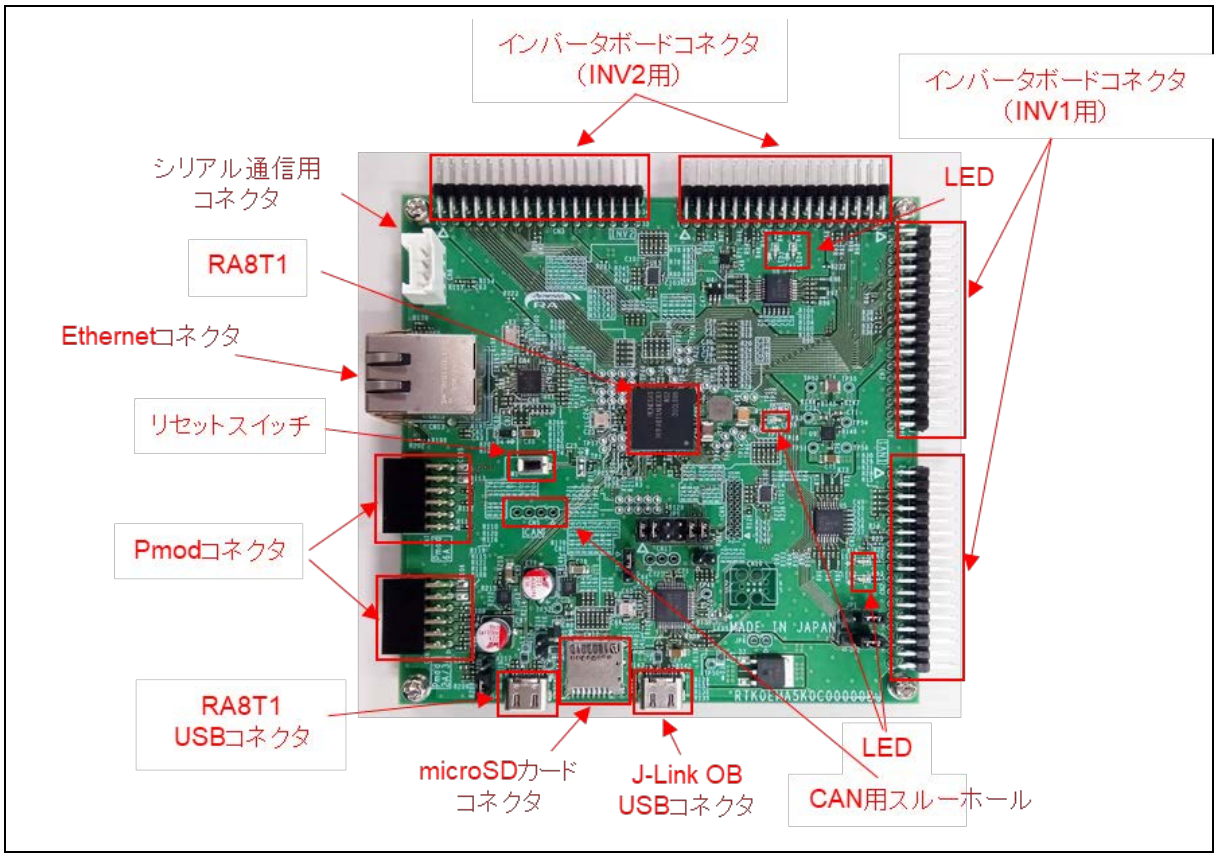


図 4-5 RA8T1 CPU ボードとインタフェース

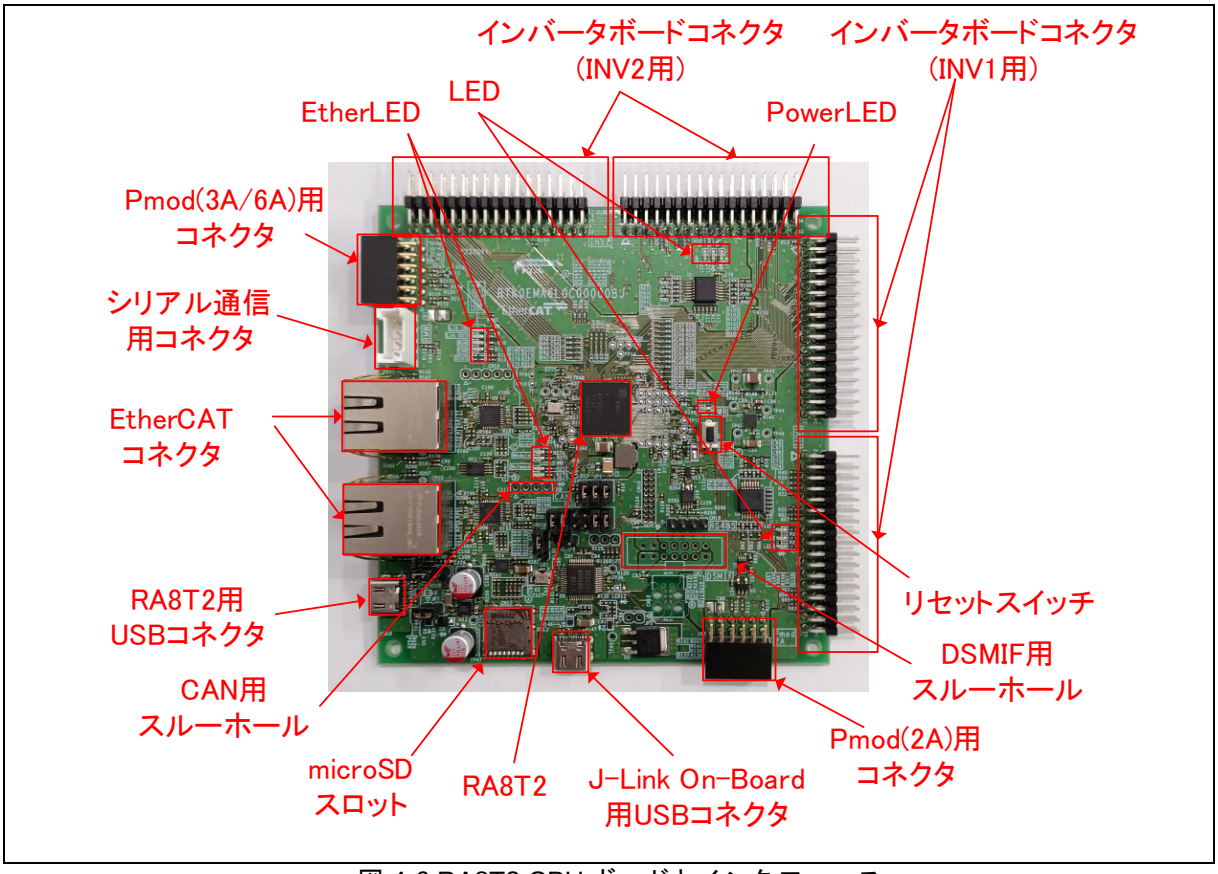


図 4-6 RA8T2 CPU ボードとインタフェース

4.7　RX26T CPU ボードのセットアップ

MCI-LV-1 に直接差し込むことができる、RX26T CPU ボードの装着方法について説明します

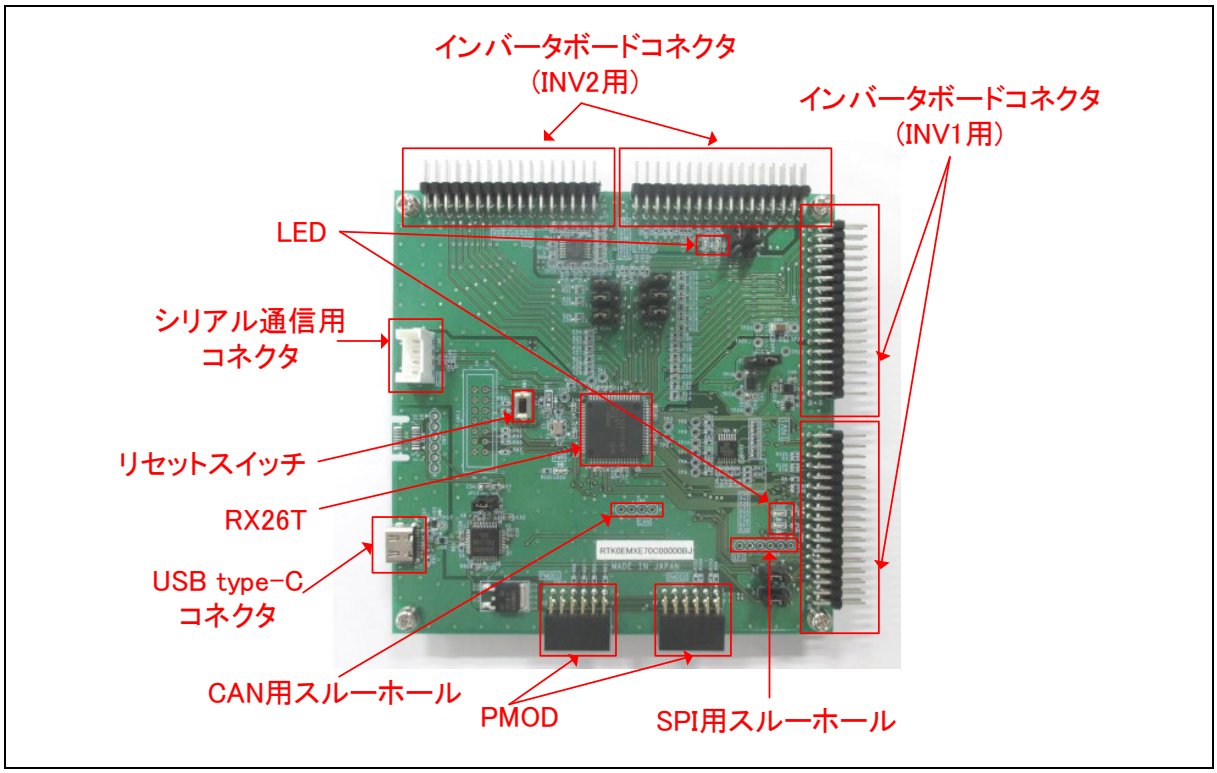


図 4-7 RX26T Type A CPU ボードとインタフェース

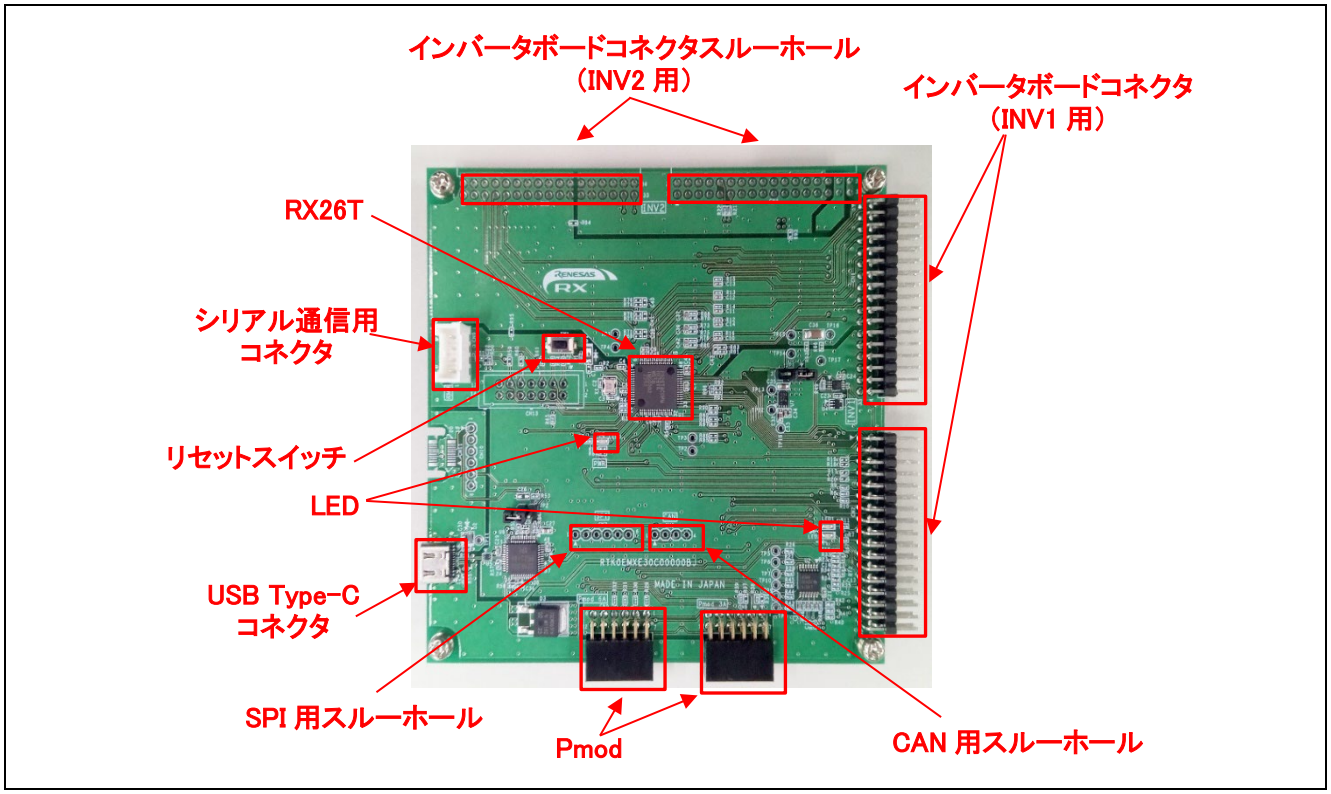


図 4-8 RX26T Type C CPU ボードとインタフェース

4.8　キットの接続例

CPU ボードをインバータボードキット (MCI-LV-1) と通信ボードキット (MC-COM　型名：: RTK0EMXC90Z00000BJ) と組み合わせて使用する際の接続例を図 4-9 に示します。

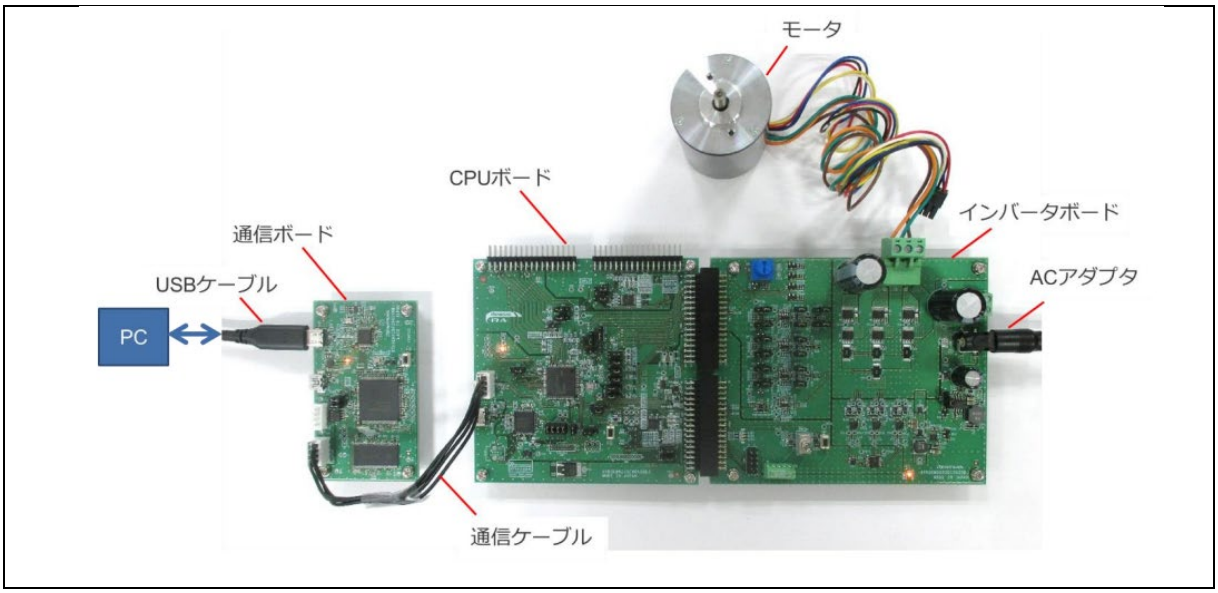


図 4-9　キット接続例

4.9　オンボードデバッガ

RA ファミリ CPU ボードにはオンボードデバッガ回路 J-Link On-Board（以下、J-Link-OB）が搭載されており、RA ファミリ のプログラムの更新は J-Link-OB を用いて行います。プログラムを更新する場合、RA ファミリ CPU ボードと PC を USB ケーブルで接続してください。RA ファミリ CPU ボードの USB コネクタは、図 4-2 では「USB type-C コネクタ」、図 4-3 から図 4-6 では「J-Link OB USB コネクタ」と記されています。

同様に、RX26T CPU ボードではオンボードデバッガ E2 Lite（以下 E2OB）が搭載されています。RX26T のプログラムの更新は E2OB を用いて行います。プログラムを更新する場合、RX26T CPU ボードと PC を USB ケーブルで接続してください。RX26T CPU ボードの USB コネクタは図 4-7、図 4-8 では USB type-C コネクタと記されています。

4.10 配線方法

電源、インバータ、モータの配線方法について説明します。ご使用する装置によって、端子の名称は異なりますので、必ず装置の取扱説明書を参照して内容・仕様を確認の上、配線作業を行ってください。

図 4-10 に、電源～インバータ間の配線例を示します。ここでは、DC 安定化電源の出力端子がインバータの P 端子および GND に接続されています。接続の際は極性を間違えないよう注意して下さい。図 4-11 に、インバータ～モータ間の配線例を示します。

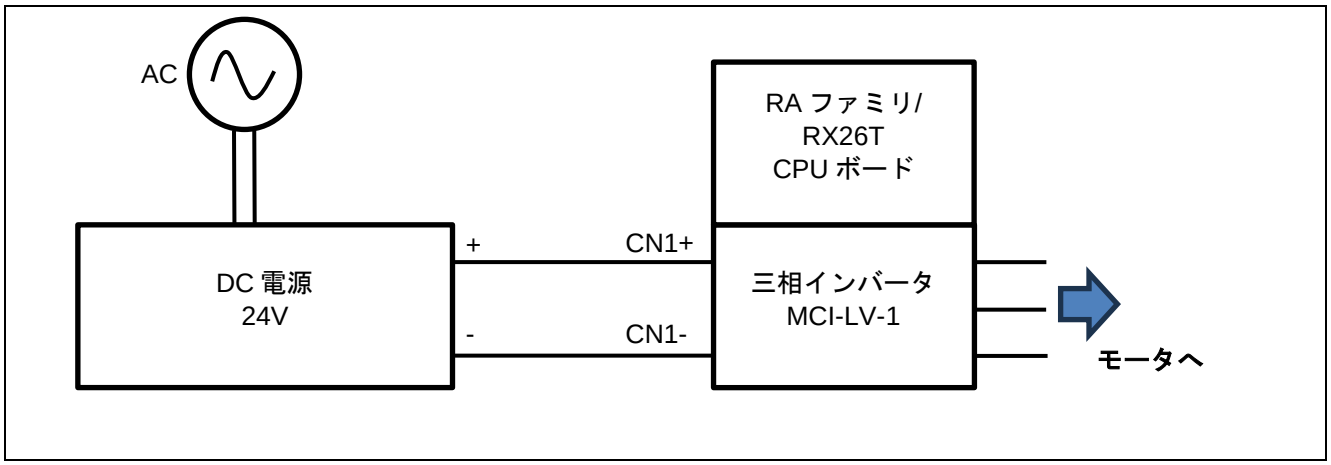


図 4-10　電源～インバータ間の配線

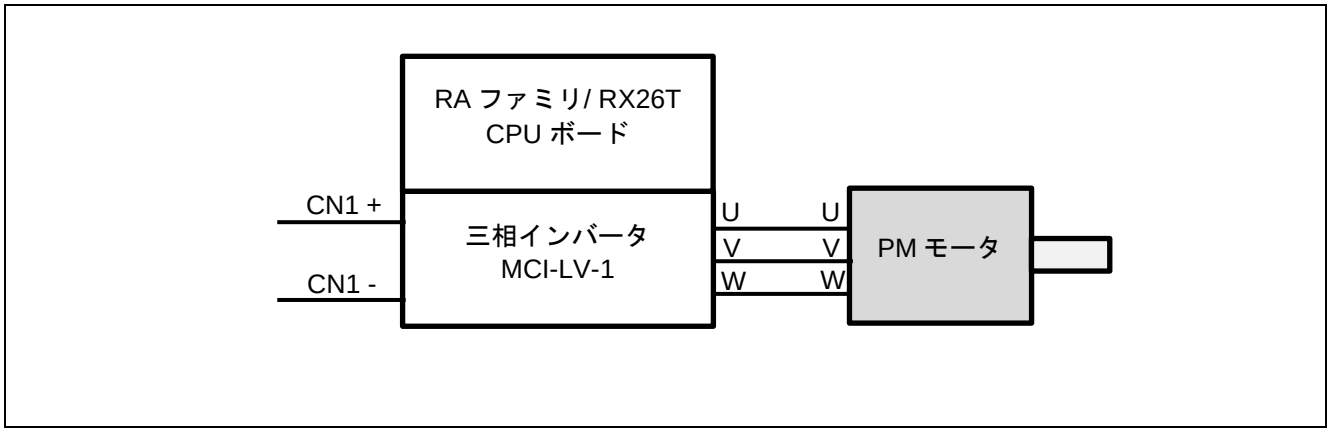


図 4-11　インバータ～モータ間の配線

4.11 測定器の利用

PM モータのセンサレス制御性能の評価を行う際には、パワーメータや、デジタルマルチメータ、トルクメータ、外付けエンコーダを用意することで、詳細なインバータ・モータ制御の分析が可能となります。ユーザ環境や、要求される測定精度、目標性能仕様に合わせて、必要な測定器を検討ください。

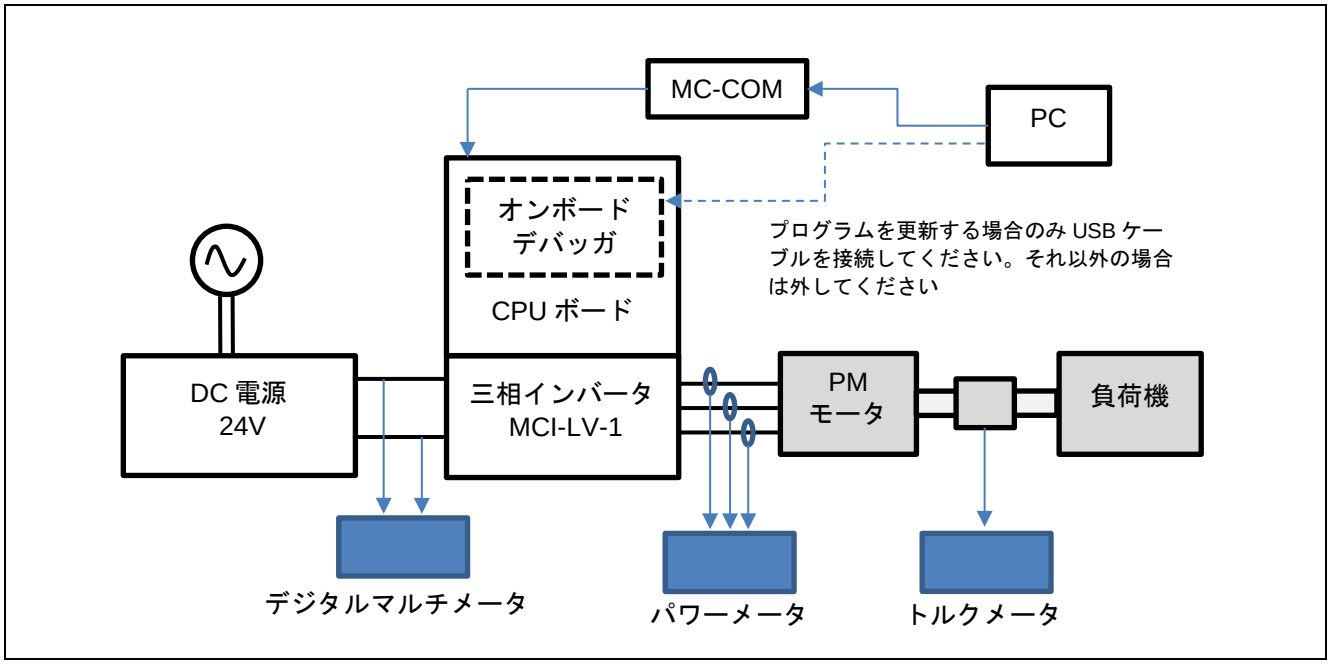


図 4-12　測定器の追加例

5. ソフトウェア環境構築方法

本章では RA ファミリ MCU および RX26T MCU 向けソフトウェア開発環境について説明します。プログラムのアップロードや更新については 6.4 で説明しています。

5.1 RA ファミリ MCU で e² studio を使用する場合

e² studio を RA ファミリ CPU ボードで使用する場合には、FSP v6.5.0 と e² studio がセットになったインストールが容易なパッケージ版 FSP with e² studio の利用が可能です。以下の弊社 FSP の WEB ページ、または GitHub を参照してください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/flexible-software-package-fsp

https://github.com/renesas/fsp/releases

e² studio の詳細な使用方法は、上記 URL でダウンロードが可能な PDF マニュアルや、ビデオを参照してください。

5.2 RX26T MCU で e² studio を使用する場合

e² studio は以下の URL からダウンロードしてください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/e-studio

インストール手順は e² studio 付属の PDF マニュアルか、Web に掲載のビデオ「e2 studio チュートリアル - RX ファミリ向け (1/4) -インストール」を参照してください。

詳細な使用方法は、上記 URL でダウンロードが可能な PDF マニュアルや、ビデオを参照してください。

5.3 RX26T MCU で CS+ を使用する場合

CS+は以下の URL からダウンロードしてください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/cs

CC-RX ならびにスマート・コンフィグレータを別途、インストールする必要があります。インストール手順は、CS+ 付属の PDF マニュアルか、Web に 掲載のビデオ「CS+ Quick Start Guide (1/4) - インストール」を参照してください。

詳細な使用方法は、上記 URL でダウンロードが可能な PDF マニュアルや、ビデオを参照してください。

6. 運転方法

6.1 運転前の注意点

モータを動かすにあたって、以下の点にご注意ください。誤った使い方により、感電や機器の故障等を引き起こす場合があります。

- トレース実行・ブレークポイントを設定した条件でモータ制御しないでください。不意の停止により、インバータが異常な動作をする場合があります。RMW および MC-COM を使用して、安全機能が正常に動作する条件下で、デバッグを行ってください。
- モータを運転するときには、CPU ボードの USB コネクタから USB ケーブルを取り外してください。CPU ボードの USB コネクタは電気的に絶縁されていませんので、インバータ異常時に GND を通じて PC に悪影響や故障を発生させる場合があります。
- MC-COM は信号が絶縁されているため、モータ運転中の場合であっても安全に使用できます。PC とインバータの GND が共通となる場合があり、GND を介して感電事故の恐れがあります。
- 非常時にモータの緊急停止が可能なように実験設備を構築してください。
- モータを高速で回転させる場合、必ずカップリング部にはガードとなるカバーを取り付けてください。カップリング等の部品が回転中に損傷した場合、回転軸の外に飛散する場合があります。
- インバータが停止しても、PM モータが回転している場合、PM モータは誘起電圧を発生させ、UVW 三相配線に電圧がかかります。露出した導電部に接触すると、感電の恐れがあります。

6.2 運転までの手順

運転を行うための準備手順は、以下の通りです。

表 6-1　運転を行うまでの手順

手順	手順内容	関連する章
1	インバータボードにあらかじめ、CPU ボードを装着します。	4.6, 4.7
2	サンプルプログラム、開発環境(e^2 studio / CS+)を使用する PC に導入します。	5
3	PC と CPU ボードを USB ケーブルで接続し、CPU ボードに 5V の電源を供給する	6.3
4	サンプルプログラムを、開発環境でビルドする	6.4
5	ビルドしたサンプルプログラムを CPU ボードに書き込む	6.4
6	PC と CPU ボードをつないだケーブルを取り外す	6.3
7	CPU ボードに MC-COM を接続する	6.3
8	インバータに DC24V の電源を供給する	4.2
9	PC にインストールされた RMW を用いて、CPU ボードに MC-COM を経由して接続し、正しく接続できることを確認する	6.5
10	本サンプルプログラムの変数や、センサ情報などが正常に RMW で表示されていることを確認する	6.7
11	RMW を用いて、モータの運転操作を行います。	6.8
12	モータを停止・遮断する	6.9

6.3　接続方法

書込み時と、運転操作時で、CPU ボードと PC の間で使用する機器が異なるため、ご注意ください。以下に、①書込み時と、②運転操作時についての配線方法を説明します。

① 書込み時

RA ファミリ CPU ボードには J-Link-OB 回路が、RX26T CPU ボードには E2OB 回路が実装されています。プログラムのダウンロードや書込みの際、USB ケーブルを PC から CPU ボードに直接つなぐことが可能であり、他の環境は必要ありません。プログラムのダウンロードが終了したら USB ケーブルを取り外してください。

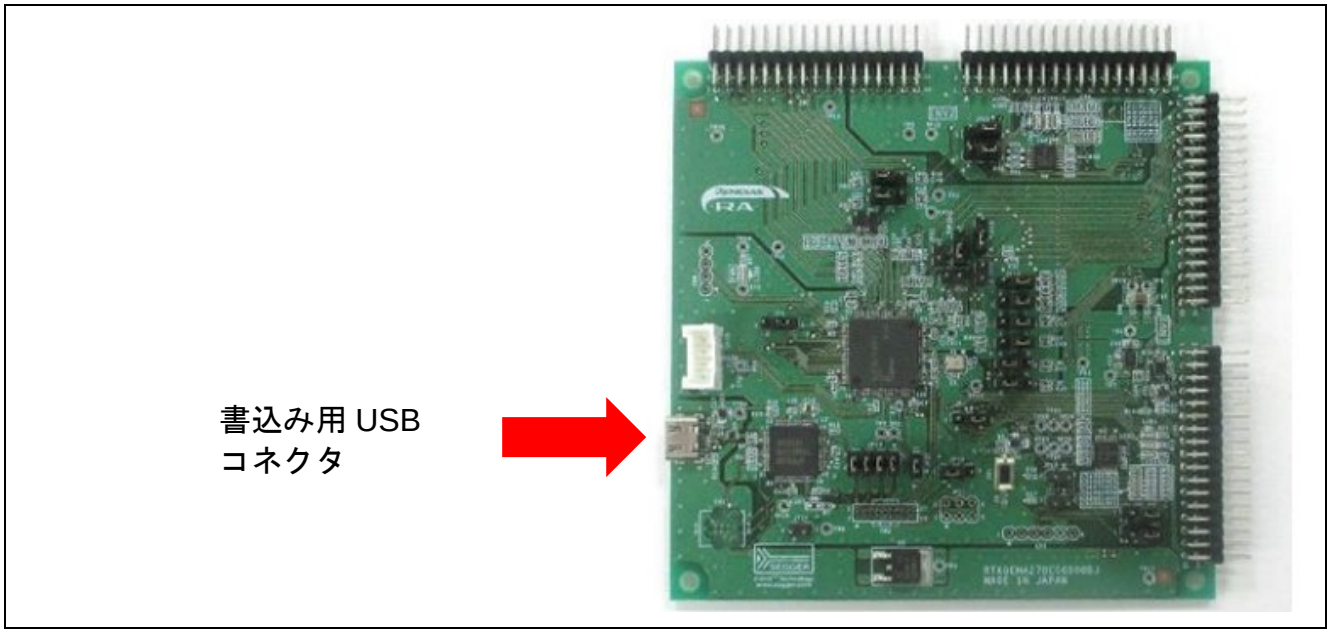


図 6-1　RA6T2 CPU ボード書込み用 USB コネクタ

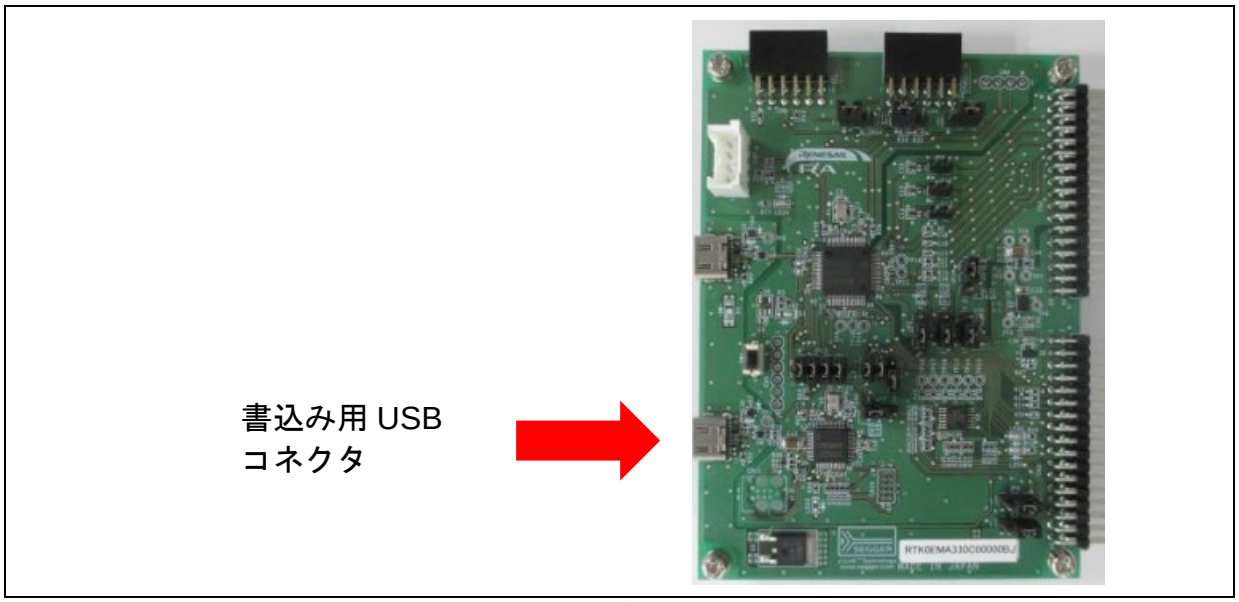


図 6-2　RA6T3 CPU ボード書込み用 USB コネクタ

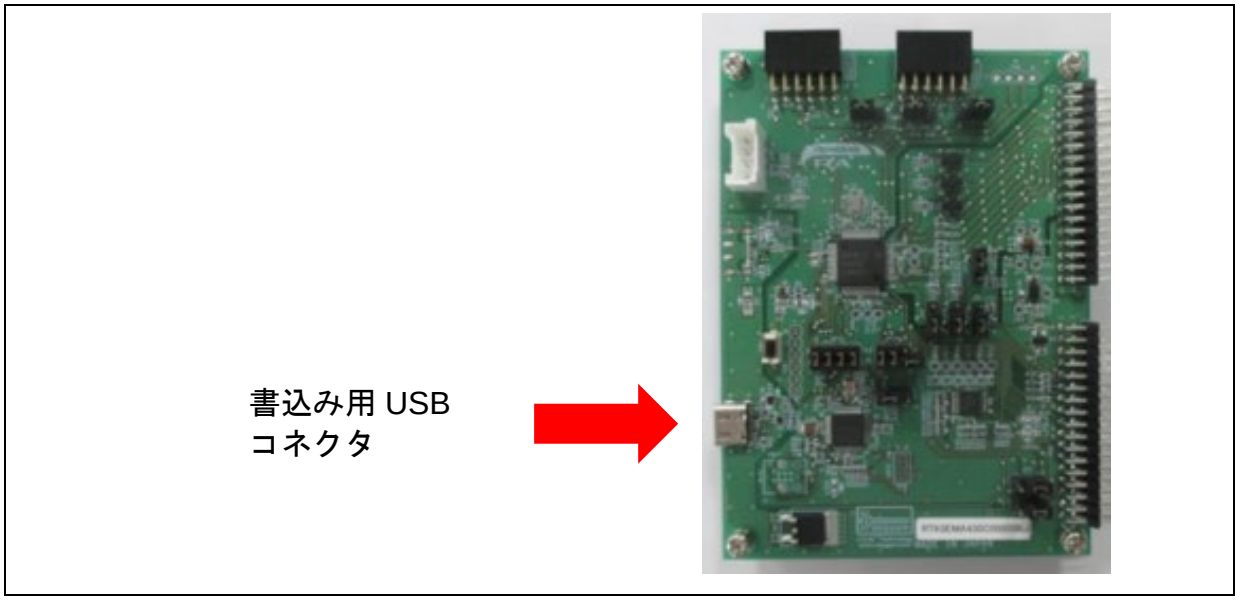


図 6-3　RA4T1 CPU ボード書込み用 USB コネクタ

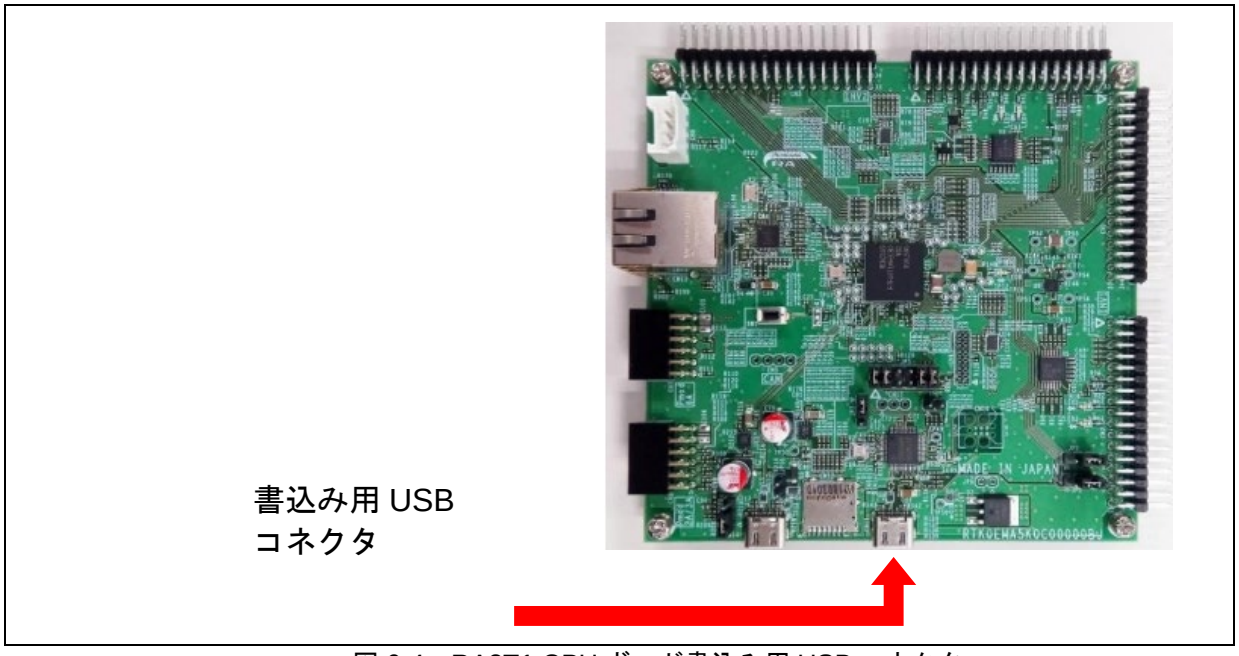


図 6-4　RA8T1 CPU ボード書込み用 USB コネクタ

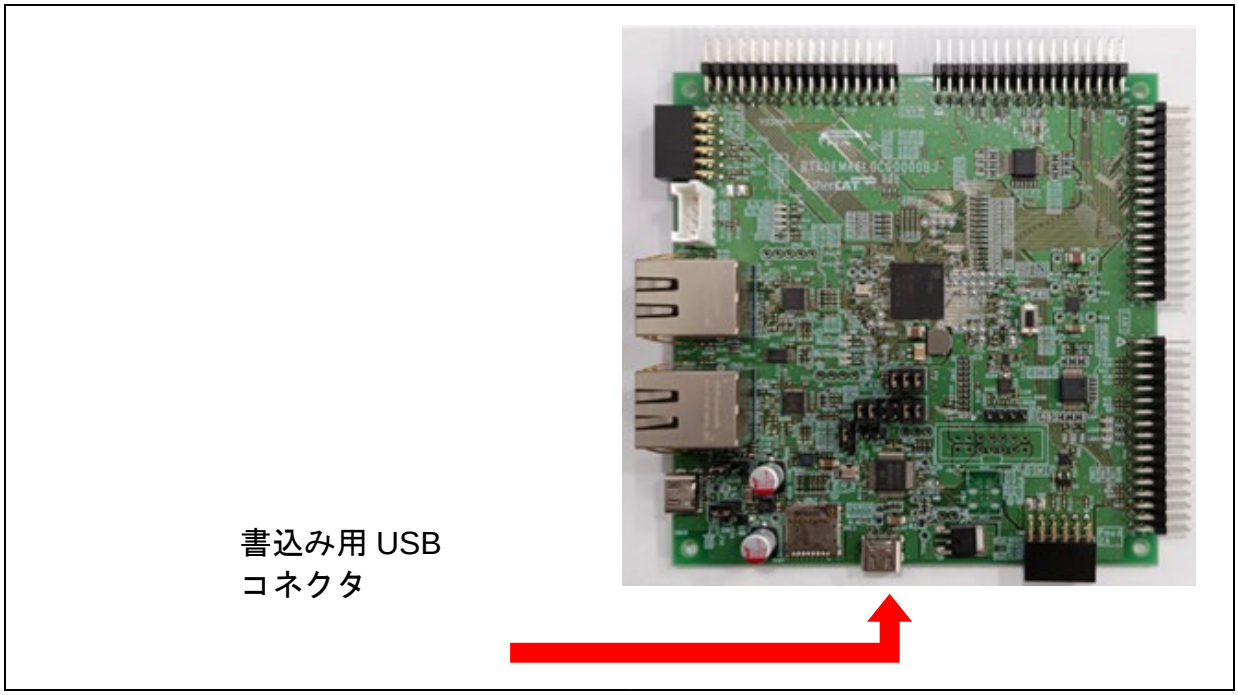


図 6-5　RA8T2 CPU ボード書込み用 USB コネクタ

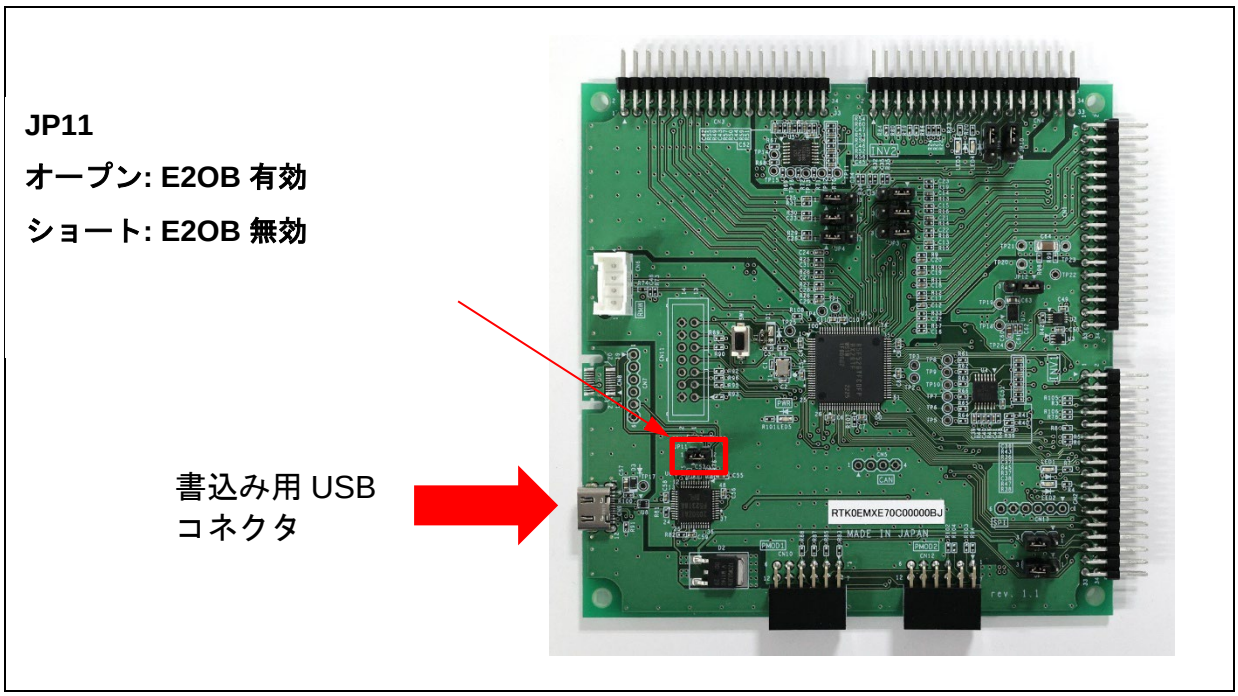


図 6-6　RX26T Type A CPU ボード書込み用 USB コネクタ

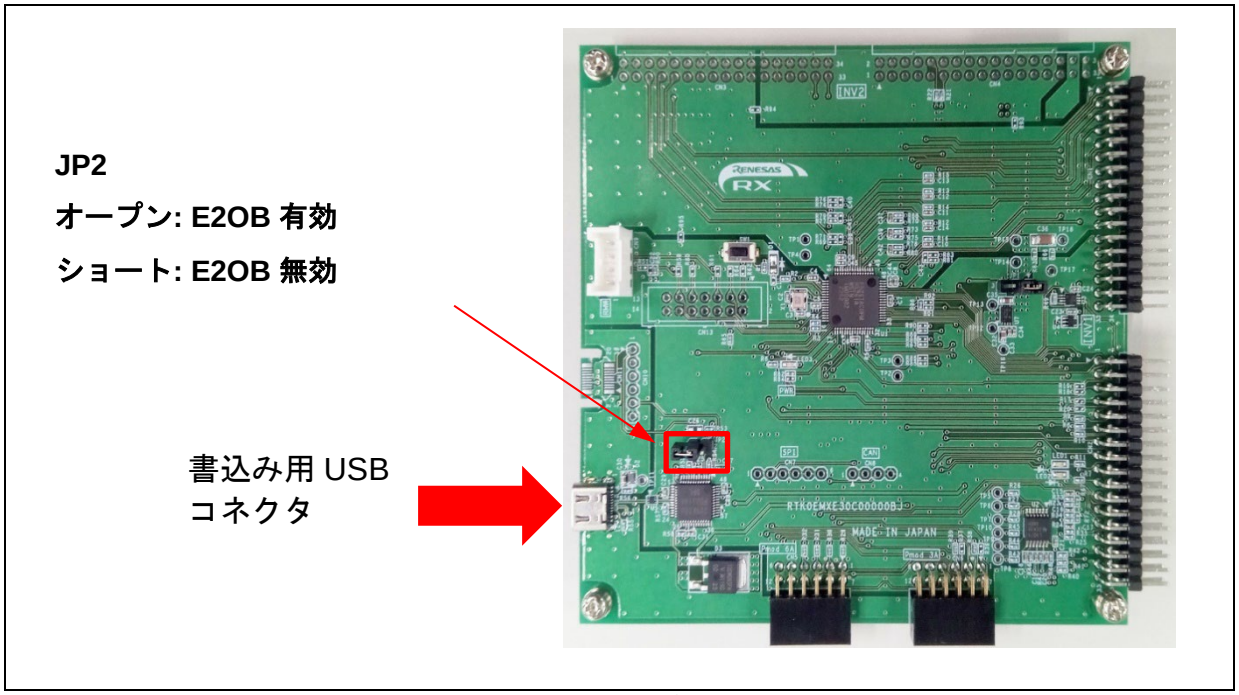


図 6-7　RX26T Type C CPU ボード書込み用 USB コネクタ

② 運転操作時

図 6-8 のように PC を通信ボード MC-COM (RTK0EMXC90S00000BJ) に接続します。CPU ボードは UART 経由で PC に接続された状態となり、PC から COM ポートを用いて操作することができます。下図のように通信ケーブルを確実に接続してください。運転操作には RMW を利用することができます。MC-COM はインバータと PC の間を電気的に絶縁しますので、安全にご利用いただけます。

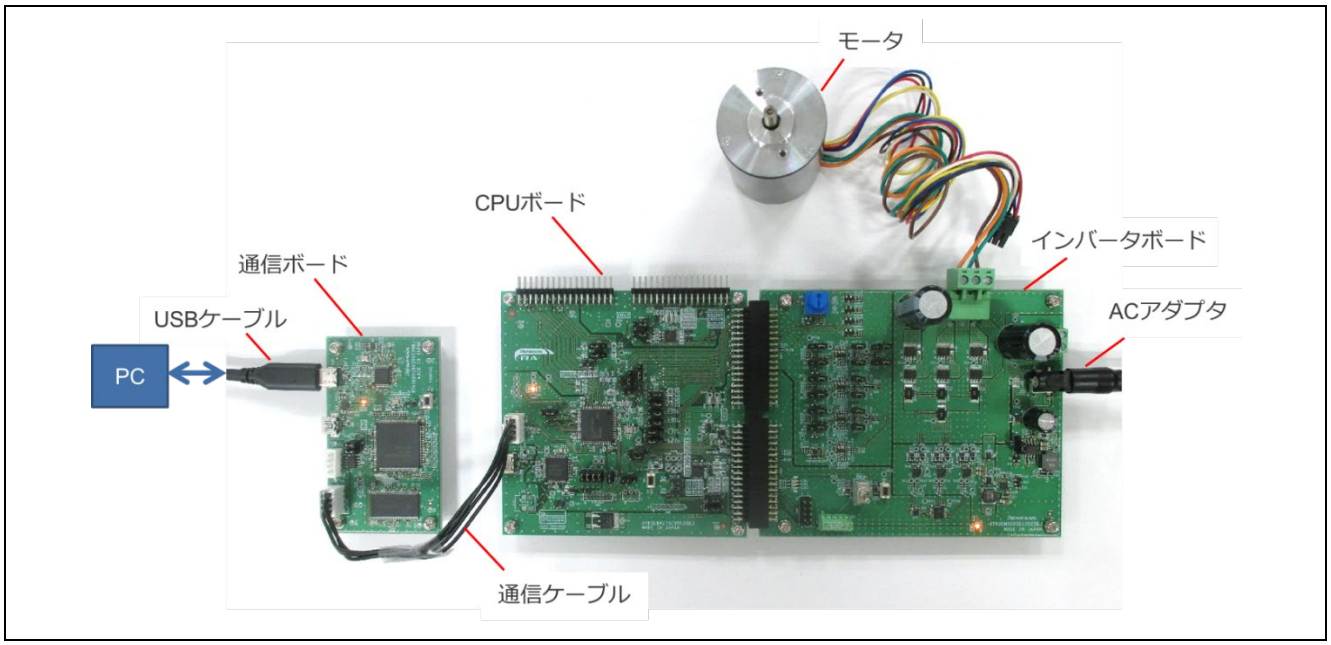


図 6-8　運転操作時の配線例

③ MCI-LV-1 インバータボードのジャンパ確認

他の環境や制御タイプでの使用により MCI-LV-1 のジャンパーピンの位置が変更されている可能性があります。下記のように設定されているか確認してください。

・インバータボード

ジャンパーピン	接続
JP8	1-2pin ショート
JP11	1-2pin ショート

JP8 および JP11 は、シャント電流検出のタイプを設定します。詳細は MCI-LV-1 ユーザーズマニュアル(R12UZ0092)を参照してください。

6.4　サンプルプログラムの書き込み

弊社 WEB サイトからダウンロードしたサンプルプログラムを、e² studio もしくは CS+（CS+ は RX26T のみ）を使用して CPU ボードの MCU に書き込んでください。

6.4.1　RA ファミリ MCU・RX26T MCU 用の e² studio のインストール

RA ファミリ MCU を利用する場合、以下の URL より FSP 対応 e² studio をダウンロードし、PC にインストールしてください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/flexible-software-package-fsp

RX26T MCU を利用する場合、以下の URL より e² studio もしくは CS+ をダウンロードし、PC にインストールしてください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/e-studio
https://www.renesas.com/ja/software-tool/cs

6.4.2　e² studio へのプロジェクトのインポート

e² studio へのプロジェクトのインポートについて説明します。CS+を利用する場合は、CS+のマニュアルをご参照ください。

1.〈ファイル〉タブを左クリックします。

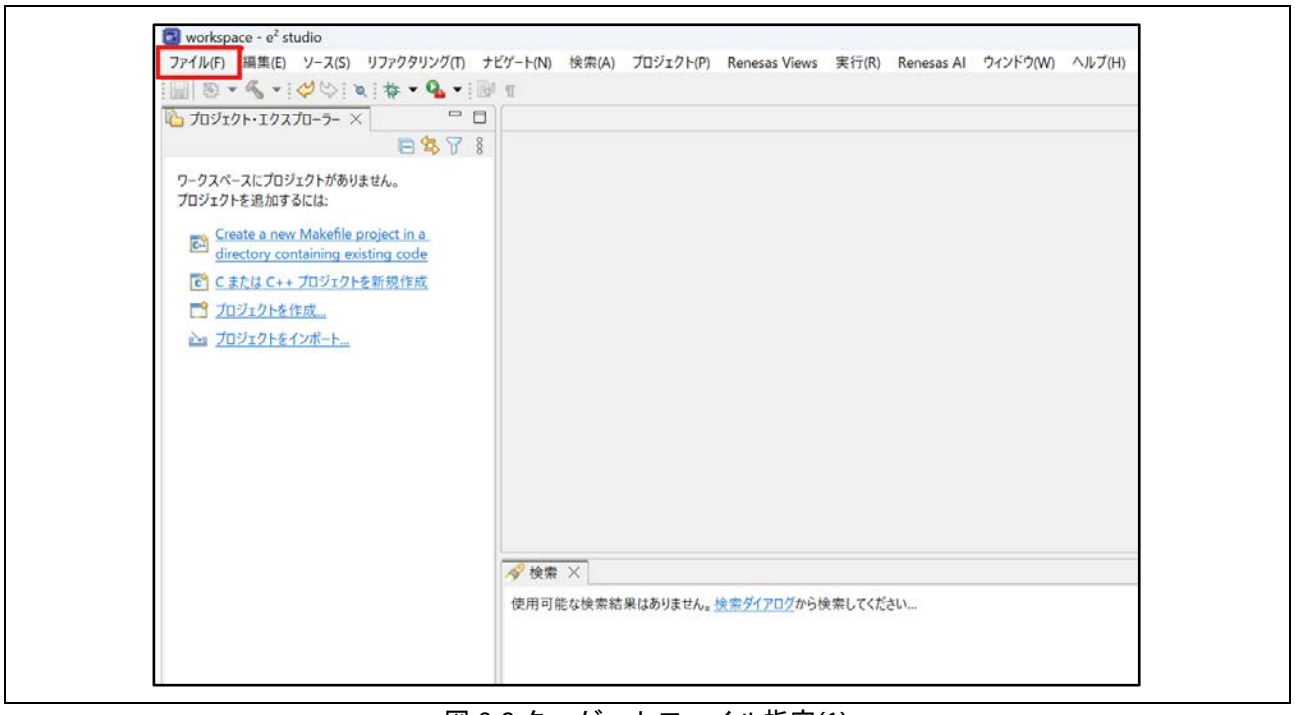


図 6-9 ターゲットファイル指定(1)

2. プルダウンメニューが表示されるので〈インポート〉を選択して左クリックします。

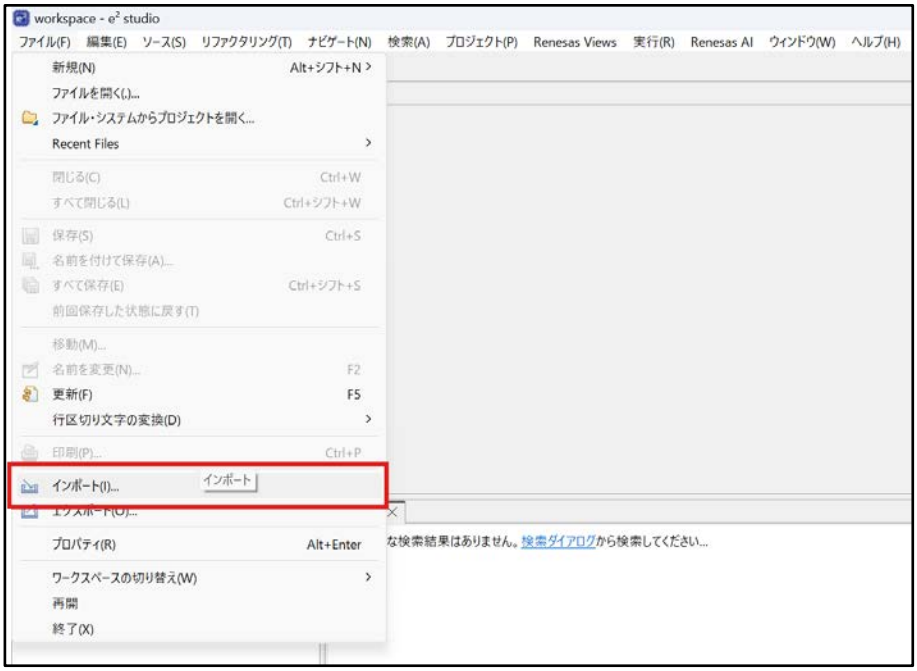


図 6-10 ターゲットファイル指定(2)

3. インポートウィンドウが開くので、〈既存プロジェクトをワークスペースへ〉を選択し、左クリックします。

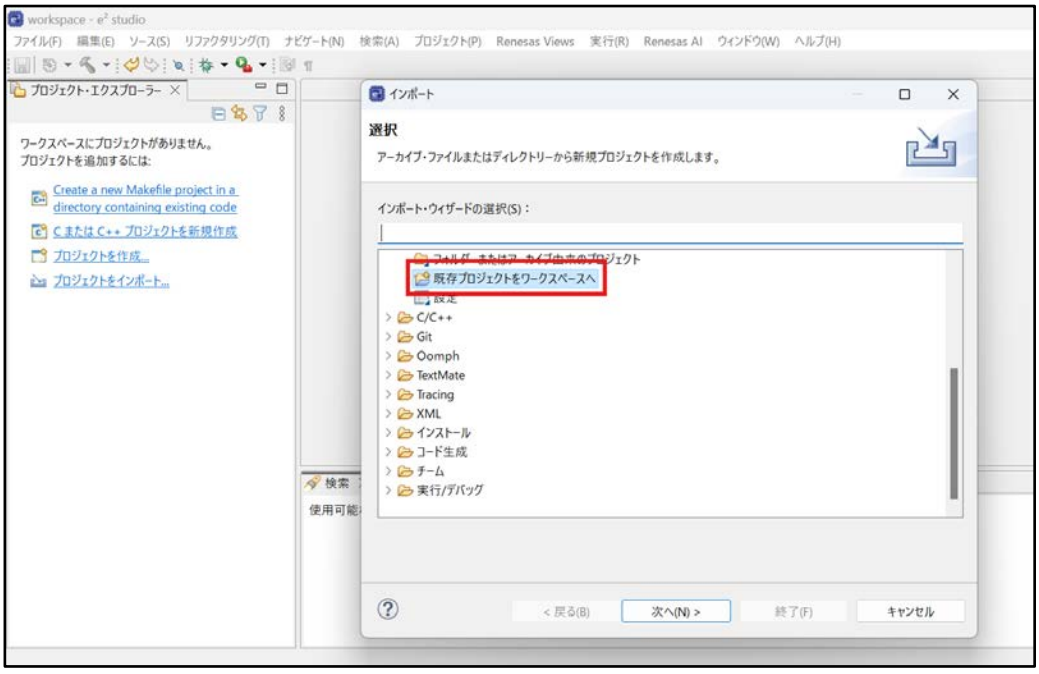


図 6-11 ターゲットファイル指定(3)

4. プロジェクトインポート画面になるので、〈参照〉を左クリックします。

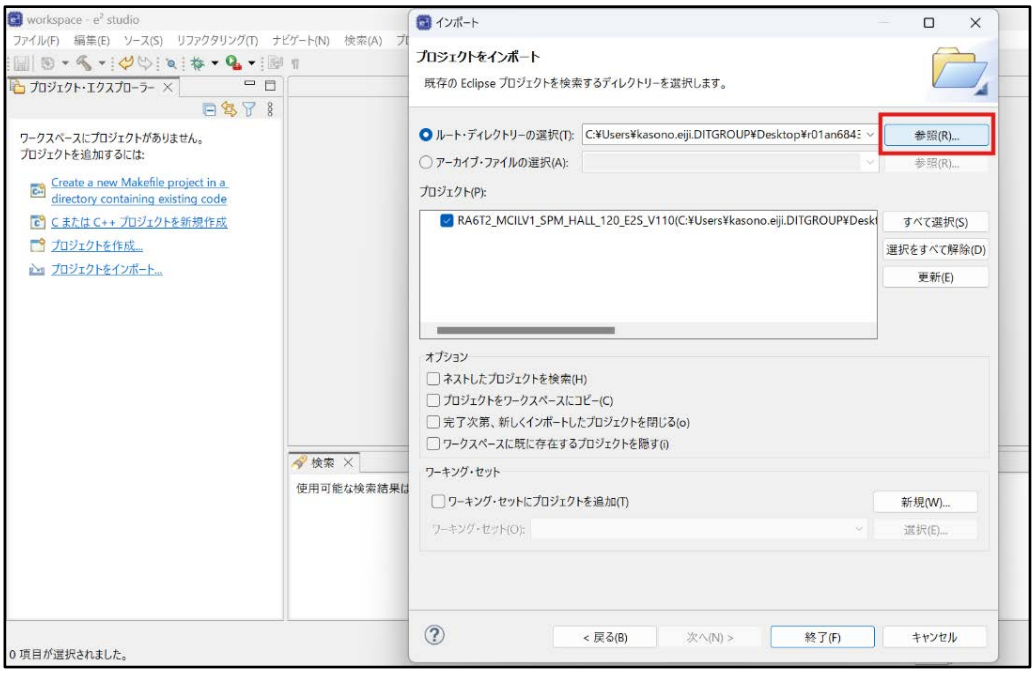


図 6-12 ターゲットファイル指定(4)

5. フォルダー選択画面が開くので、ターゲットのフォルダーを選択し、〈フォルダーの選択〉を左クリックします。

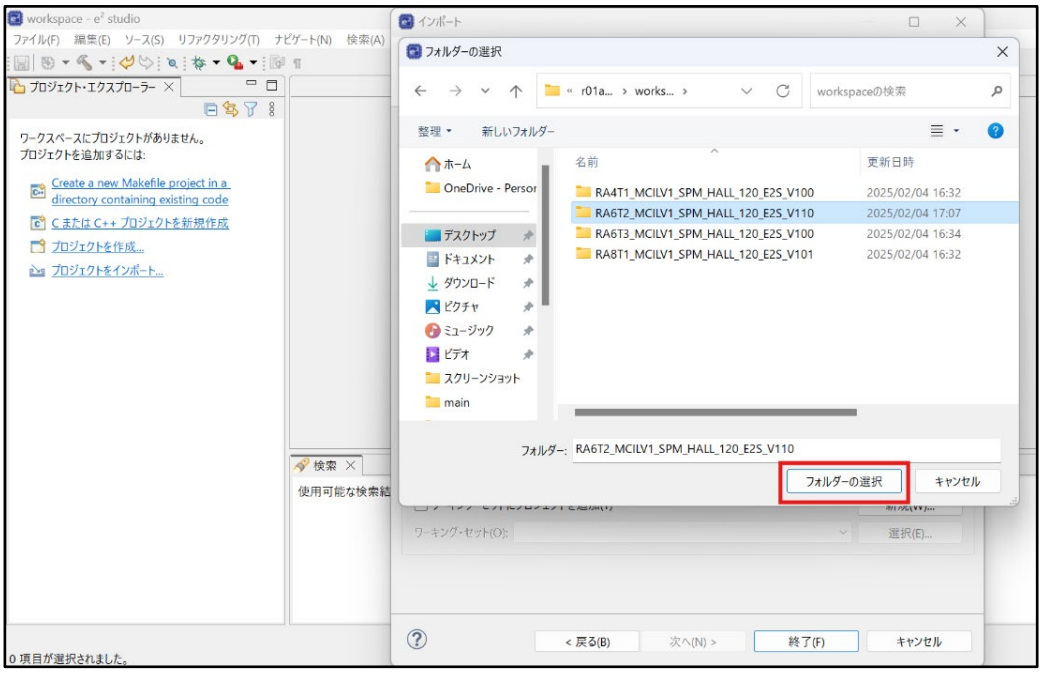


図 6-13 ターゲットファイル指定(5)

6. 正しくターゲットプロジェクトが読み込まれると図 6-14 のようになるので、確認して〈終了〉を左クリックします。

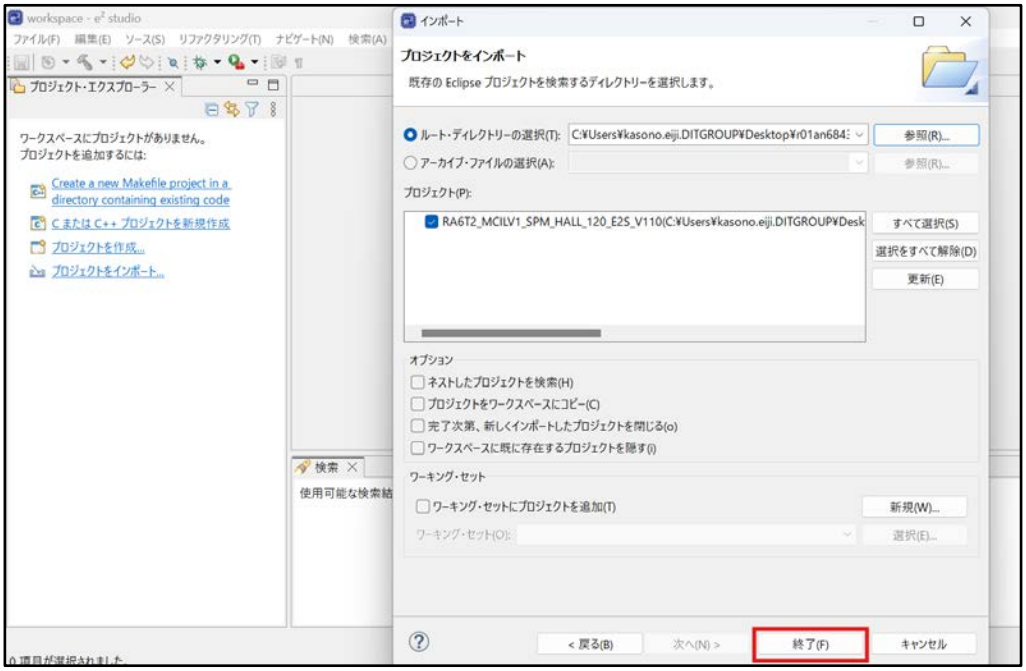


図 6-14 ターゲットファイル指定(6)

7. e² studio 上にターゲットプロジェクトがインポートされたことを確認します。

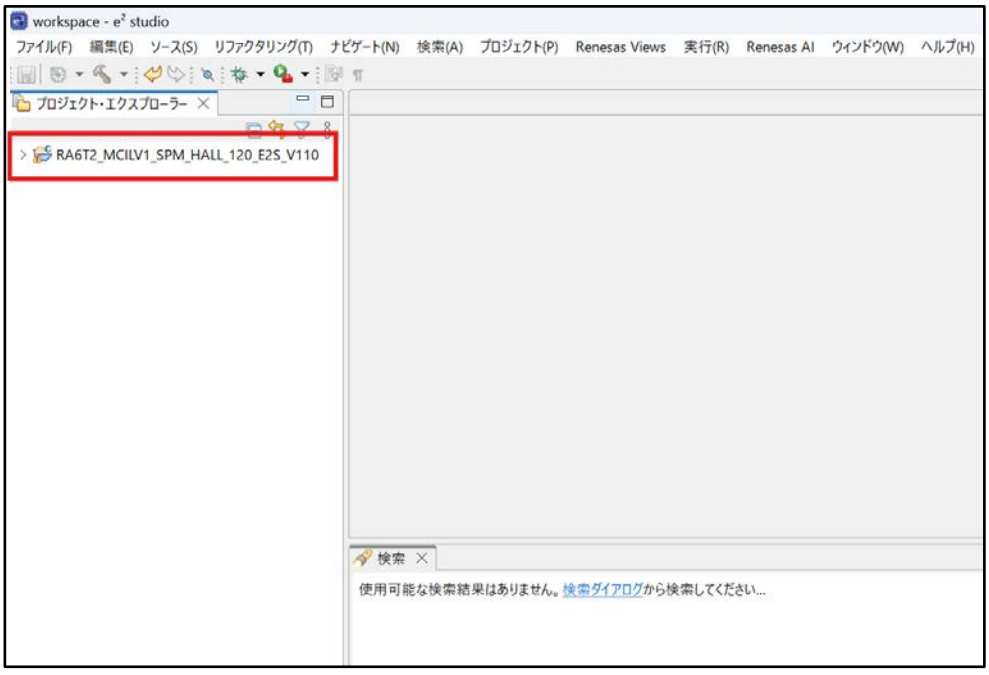


図 6-15 ターゲットプロジェクトインポート確認

6.4.3 e² studio でのプロジェクトのビルド

e² studio でのプロジェクトのビルドについて説明します。CS+を利用する場合は、CS+のマニュアルをご参照ください。

1. 6.4.2 でインポートした書き込みたいプロジェクトを右クリックします。

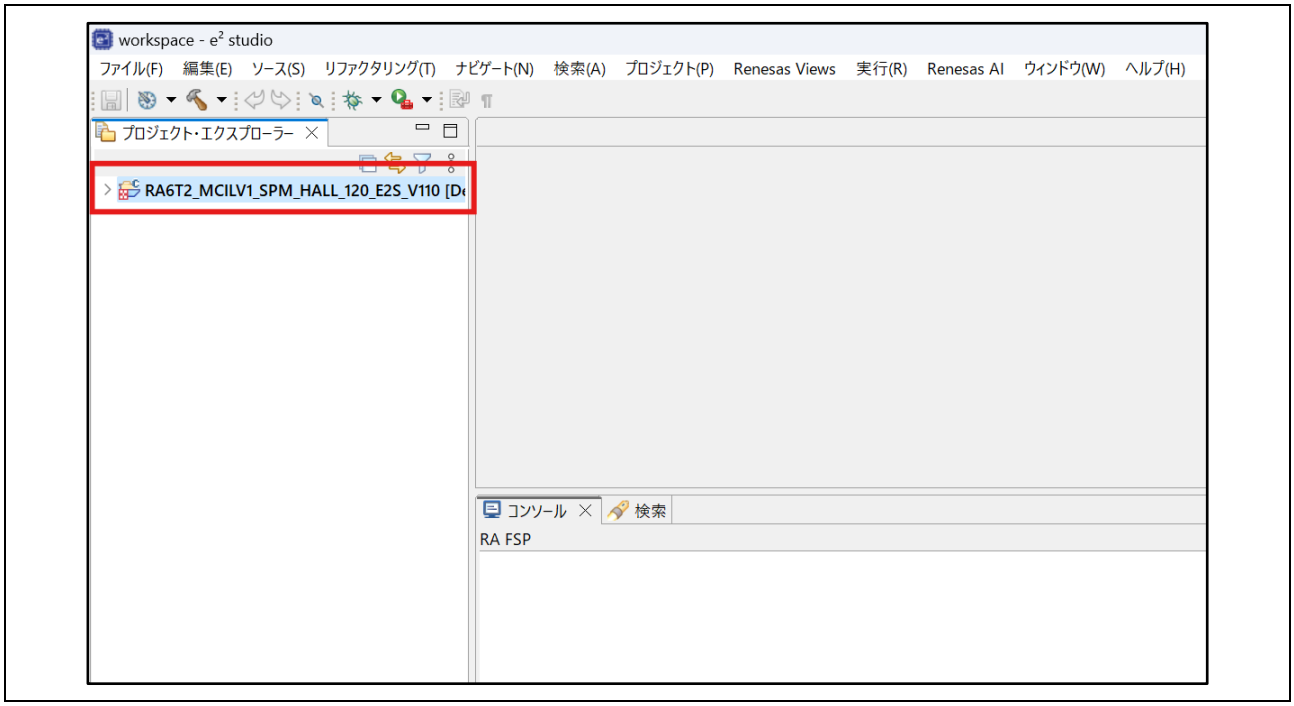


図 6-16 ターゲットプロジェクトの指定

2. プルダウンメニューが開くので、〈プロジェクトのビルド〉を選択し左クリックします。

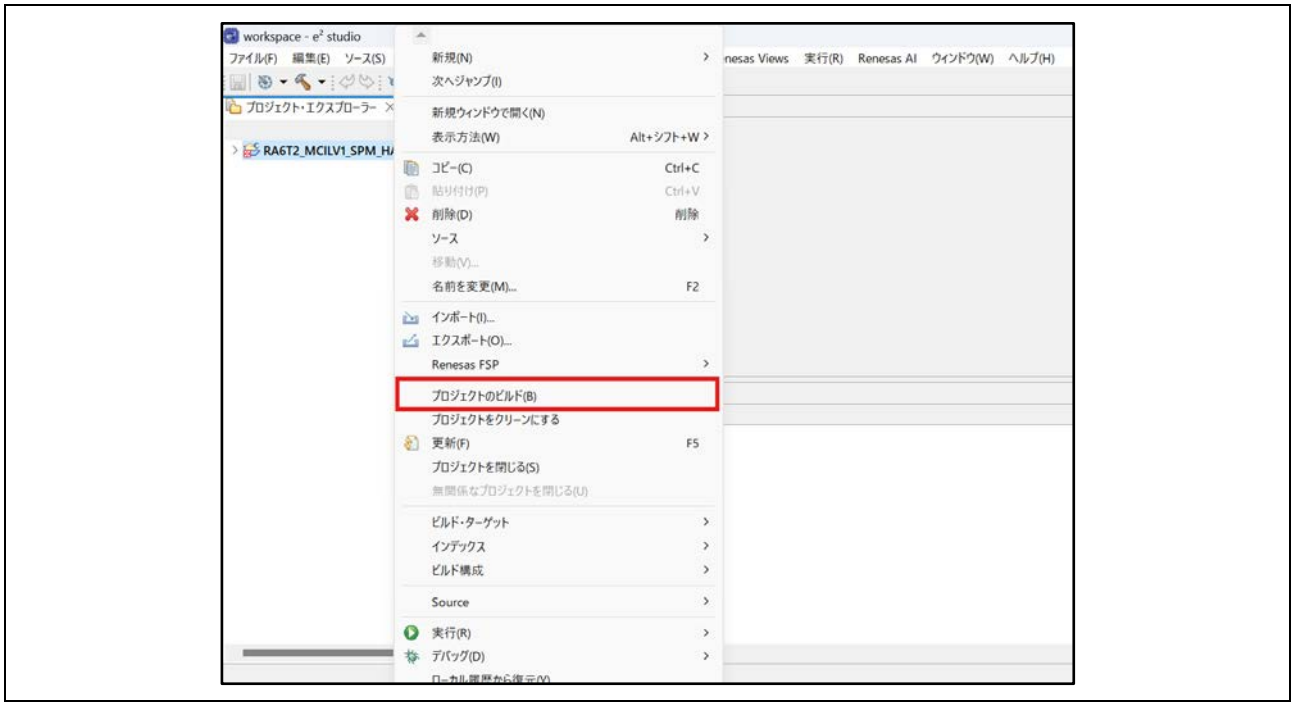


図 6-17 プルダウンメニュー

3. ビルドが実行され、コンソールウィンドウにビルドプロセスが表示されます。最終的にビルドがエラー無く完了したことを確認してください。

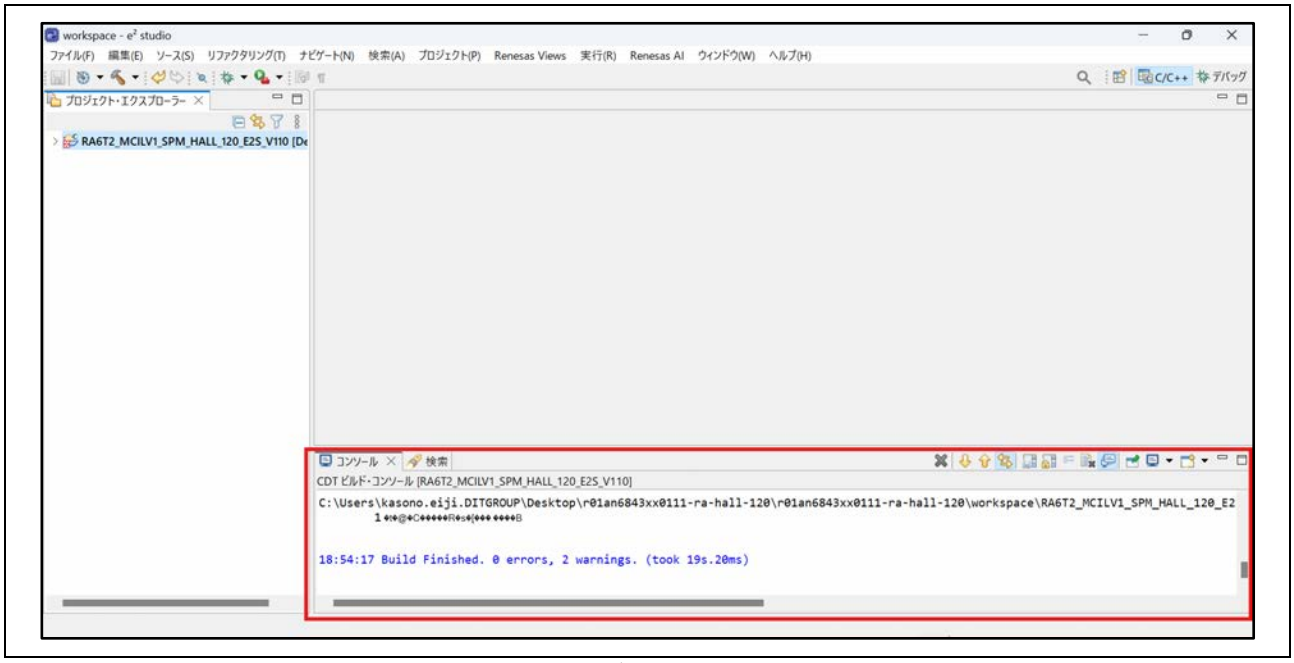


図 6-18 ビルド終了確認

6.4.4　PC とターゲット CPU ボードを USB ケーブルで接続

以下の図のように PC と CPU ボードを USB ケーブルで接続してください。
(図のターゲットボードは RA6T2 を使用)

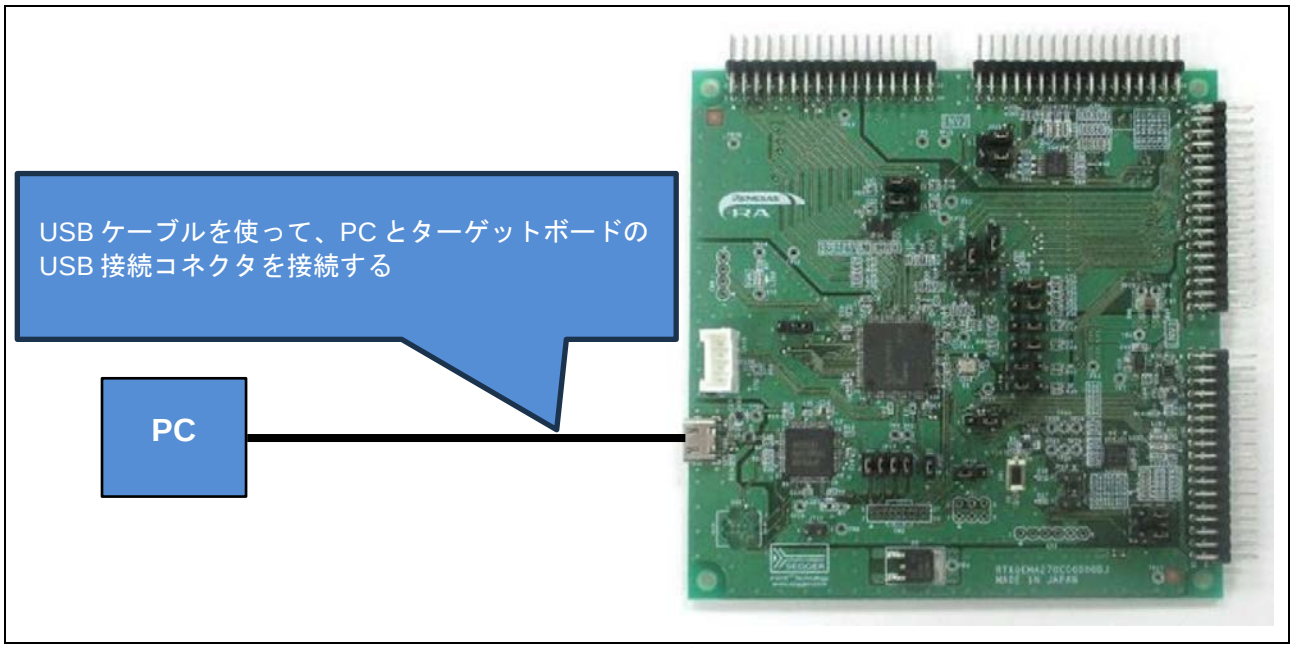


図 6-19 PC とターゲットボード (RA6T2) の接続

6.4.5　ターゲットボードへの書き込み(ビルド済み)

e² studio での書込みついて説明します。CS+を利用する場合は、CS+のマニュアルをご参照ください。

1. 書き込みたいプロジェクトを右クリックします。

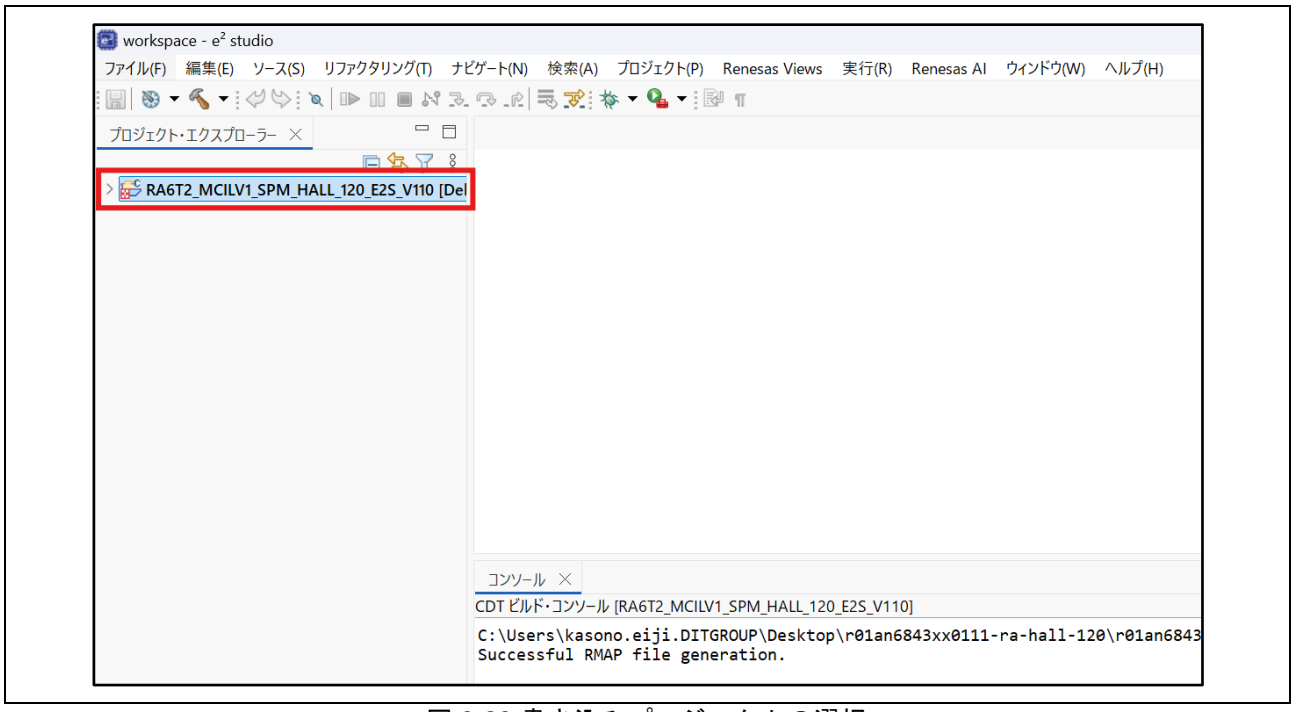


図 6-20 書き込みプロジェクトの選択

2. プルダウンメニューが開くので〈デバッグ〉にカーソルを置き、開いたウィンドウで〈Renesas GDB Hardware Debugging〉を左クリックします。

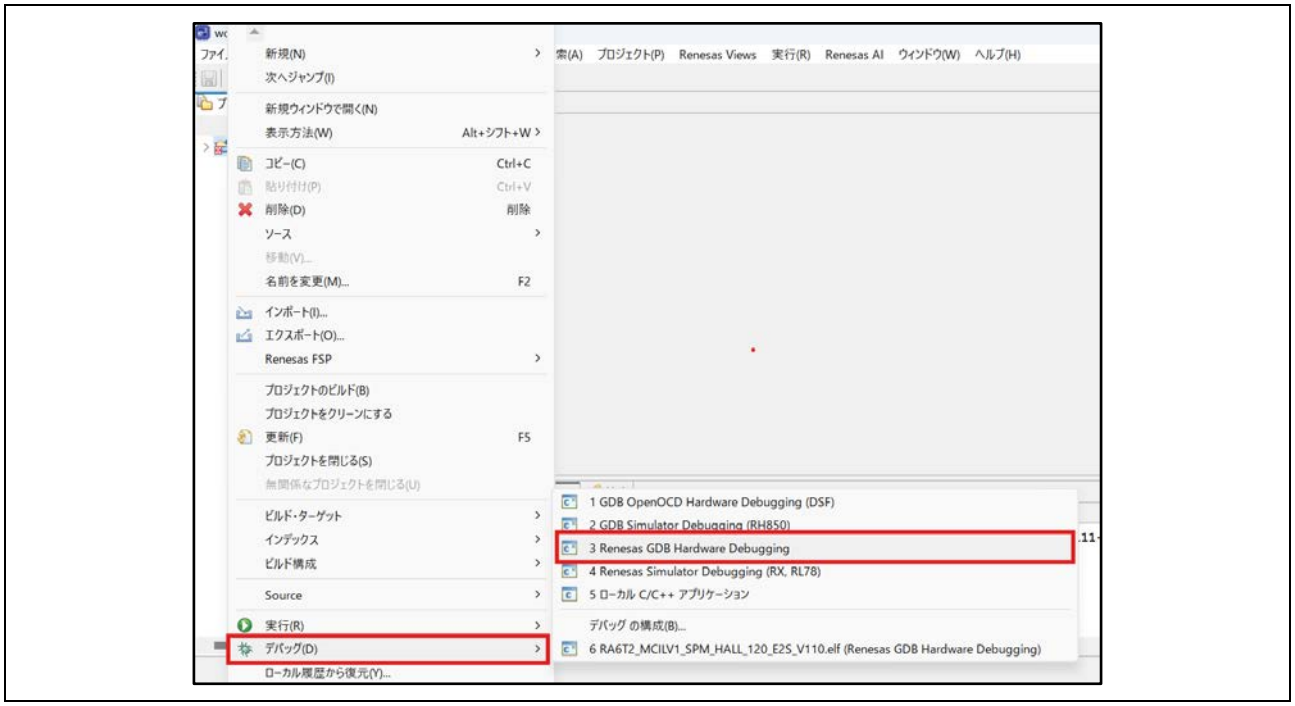


図 6-21 デバッグ方法の選択

3. 正しくターゲットボードと接続され、プログラムがダウンロードされた場合、図 6-22 のような〈デバッグ画面〉に移行します。

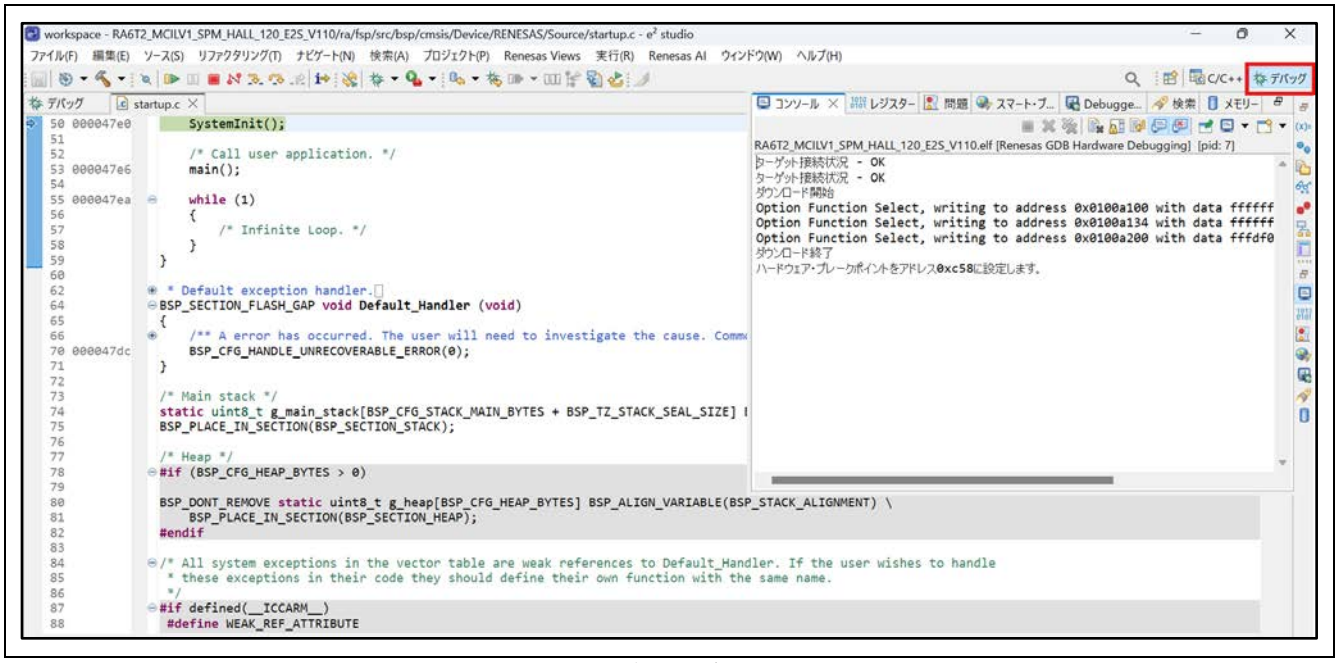


図 6-22 デバッグ画面

4. デバッグ画面の■をクリックして、ターゲットボードとの接続を遮断

USB ケーブルを外して、ターゲットボードへの書き込み完了です。

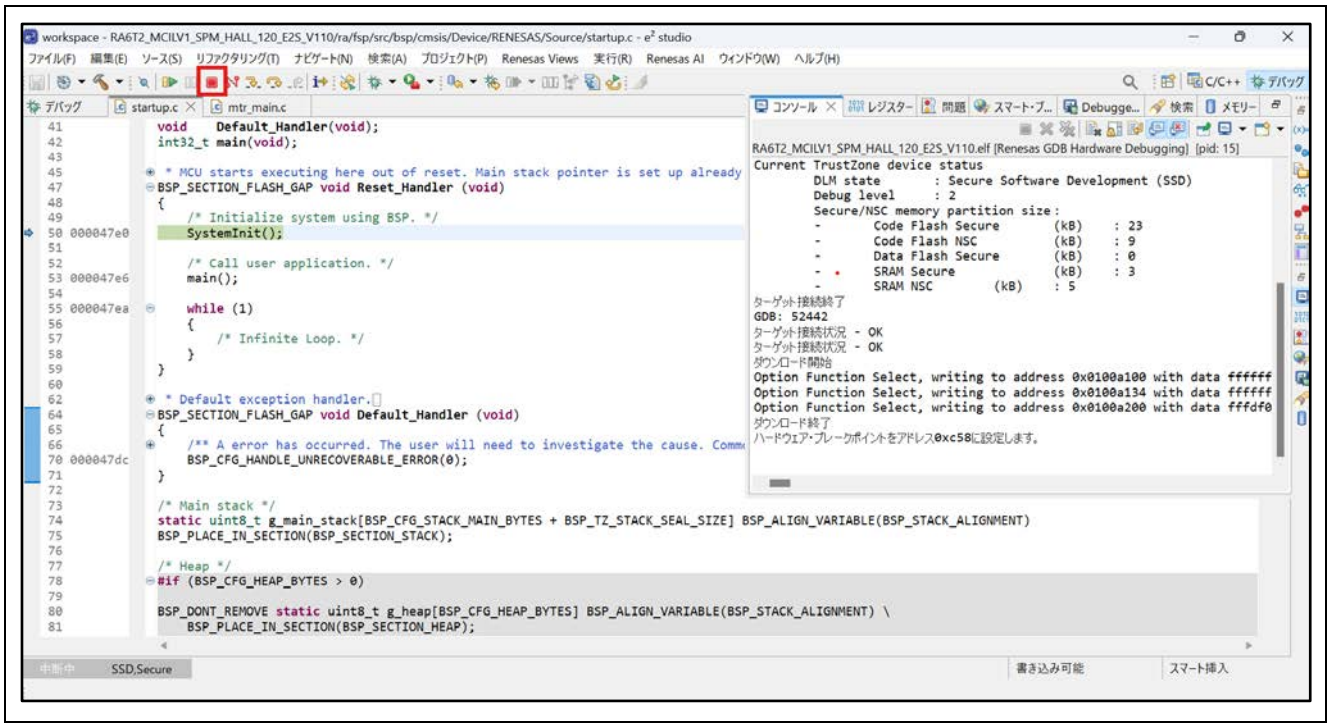


図 6-23 ターゲットボードとの切断

6.5　RMW の導入方法

モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench（RMW）」をユーザインタフェース（回転／停止指令、回転速度指令等）として使用します。モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」は弊社 WEB サイトより入手してください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/renesas-motor-workbench

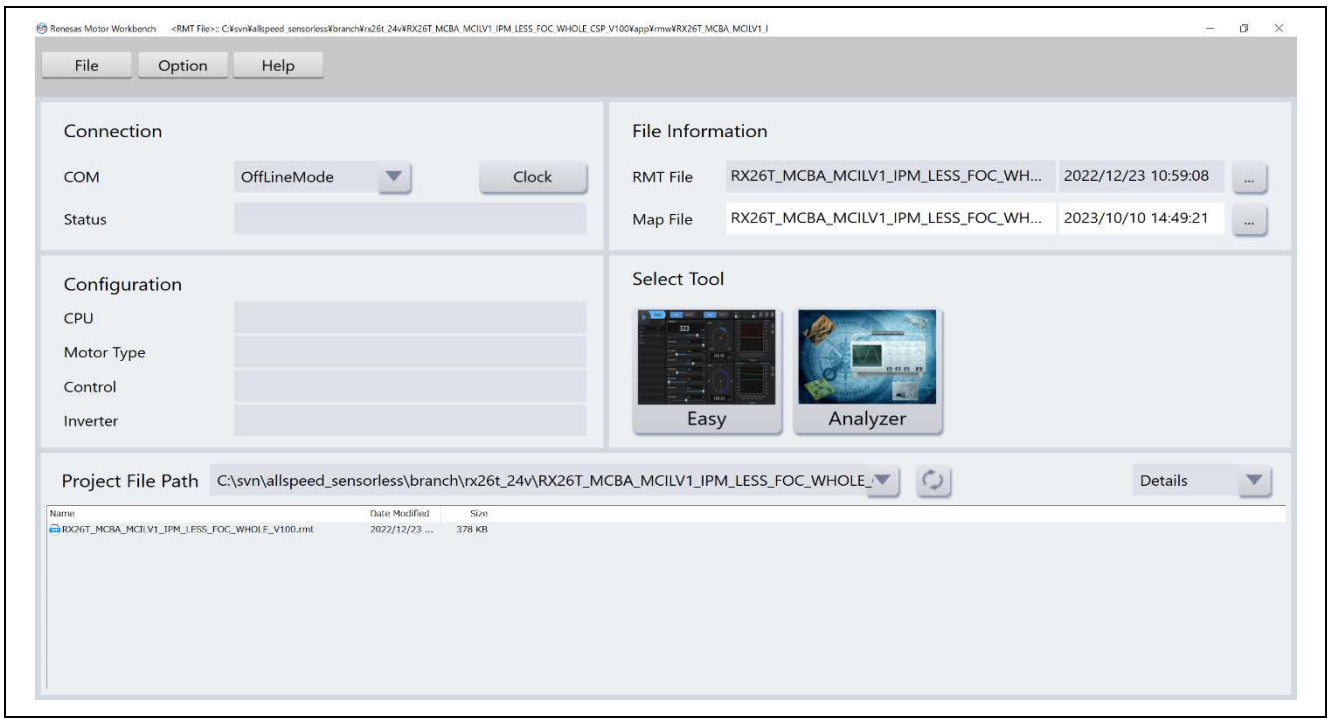


図 6-24　Renesas Motor Workbench 外観

6.6　Map ファイルの登録更新

サンプルプログラムの一部を変更した場合、変数などの情報が記載された Map ファイルを RMW に登録更新する作業が必要になります。サンプルプログラムの変更を行っていない場合には、Map ファイルの登録更新作業は不要です。

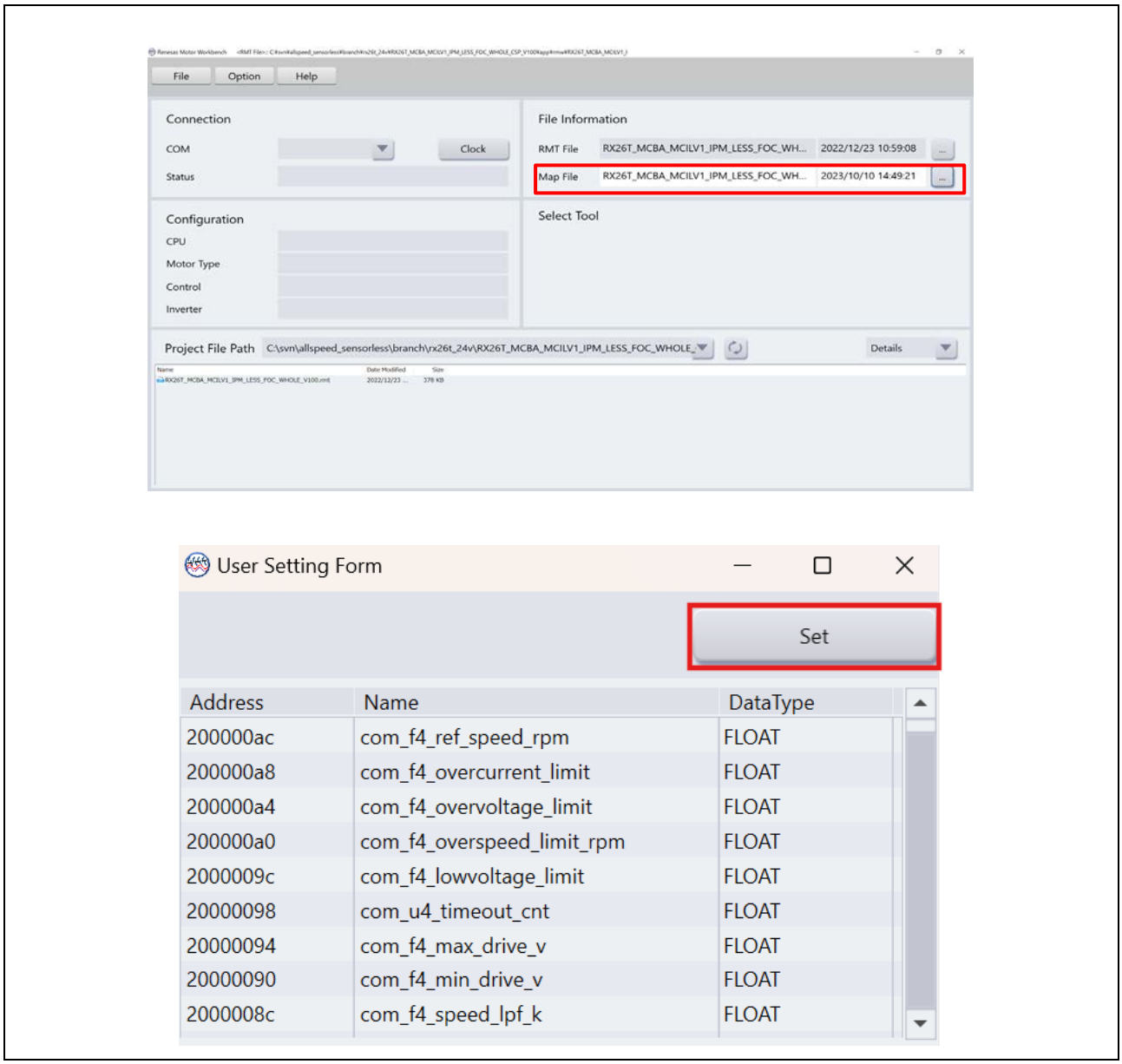


図 6-25　RMW の Map ファイル登録設定個所（上）と反映画面（下）

6.7　RMW の操作に使用する変数

本サンプルプログラムで、モータを動かす場合には、RMW を用いて制御することができます。RMW UI 使用時の入力用変数一覧を表 6-2 に示します。なお、これらの変数への入力値は com_u1_enable_write に g_u1_enable_write と同じ値を書き込んだ場合にモータモジュール内の対応する変数へ反映され、モータ制御に使用されます。ただし、(*) が付けられた変数は com_u1_enable_write に依存しません。

モータ制御に用いるその他のパラメータは、表 6-4 を参照してください。

なお、変数名の接頭辞 (u1,f4 等) は変数型の省略形となっています。RMW は変数名の接頭辞を自動認識して型を自動で選択し、Control Window で変数内部の数値の表示を行います。

表 6-2　Analyzer 機能主要入力用変数一覧

Analyzer 機能入力用変数名	型	内容
com_u1_system_mode (*)	uint8_t	インバータのステート管理 0：モータ停止モード 1：モータ駆動モード 3：エラーリセット
com_f4_ref_speed_rpm (*)	float	速度指令値（機械角）[r/min]
com_u1_enable_write	uint8_t	ユーザ入力用変数書き換え許可 g_u1_enable_write と変数一致で入力データ反映
g_u1_update_param_flag	uint8_t	バッファ転送完了フラグ
g_u1_system_mode	uint8_t	システムモード 0：モータ停止 1：モータ駆動 2：エラー
g_u1_enable_write	uint8_t	変数書き換え許可

次に速度制御の駆動評価を行います。その際に観測することの多い主要な構造体変数の一覧を表 6-3 に示します。Analyzer 機能で波形表示します。変数の値を読み込む際に参考にしてください。

表 6-3　主要変数一覧

主要変数名	型	内容
g_st_sensorless_vector.u2_error_status	uint16_t	エラーステータス。詳細は 6.86.8 (c)“止まってしまった（エラー）場合の処理”を参照
g_st_cc.f4_vdc_ad	float	インバータ母線電圧値[V]
g_st_cc.f4_id_ref	float	d 軸電流指令値 [A]
g_st_cc.f4_id_ad	float	d 軸電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iq_ref	float	q 軸電流指令値 [A]
g_st_cc.f4_iq_ad	float	q 軸電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iu_ad	float	U 相電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iv_ad	float	V 相電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iw_ad	float	W 相電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_vd_ref	float	d 軸電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_vq_ref	float	q 軸電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_refu	float	U 相電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_refv	float	V 相電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_refw	float	W 相電圧指令値 [V]
g_st_cc.st_rotor_angle.f4_rotor_angle_rad	float	推定磁極位置[rad]
g_st_sc.f4_ref_speed_rad_ctrl	float	速度指令値（機械角）[rad/s]
g_st_sc.f4_speed_rad	float	速度検出値（機械角）[rad/s]

以下に示す com 変数は、RMW からの操作で、モータの定数やゲイン・パラメータを動的に変更することができます。ただし、電源の入り切りやマイコンのリセットによって、書き込んだ値はクリアされますので、使用時はご注意ください。

表 6-4　com 変数一覧

変数	説明
com_u2_offset_calc_time	電流オフセット値計算時間設定
com_u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間[cnt]
com_u2_mtr_pp	駆動するモータの極対数
com_f4_mtr_r	駆動するモータの抵抗* [Ω]
com_f4_mtr_ld	駆動するモータの d 軸インダクタンス* [H]
com_f4_mtr_lq	駆動するモータの q 軸インダクタンス* [H]
com_f4_mtr_m	駆動するモータの磁束* [Wb]
com_f4_mtr_j	駆動するモータのロータイナーシャ [kgm^2]
com_f4_nominal_current_rms	駆動するモータの定格電流 [Arms]
com_f4_max_speed_rpm	駆動するモータの速度最大値（機械角）[r/min]
com_f4_current_omega_hz	電流制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_current_zeta	電流制御系減衰係数
com_f4_speed_omega_hz	速度制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_speed_zeta	速度制御系減衰係数
com_f4_speed_lpf_hz	速度 LPF カットオフ周波数[Hz]
com_f4_speed_rate_limit_rpm	速度指令最大増減幅 [r/min/s] （速度制御時使用,機械角）

変数	説明
com_f4_overspeed_limit_rpm	速度制限値（機械角）[r/min]
com_u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_flying_start_use	フライングスタートの設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_stall_detection_use	脱調検出の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_less_switch_use	オープンループ制御時の切り替え機能設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_openloop_damping_use	オープンループ制御時のダンピング制御設定 0：無効，1：有効
com_f4_e_obs_omega_hz	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_e_obs_zeta	誘起電圧推定系減衰係数
com_f4_pll_est_omega_hz	位置推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_pll_est_zeta	位置推定系減衰係数
com_f4_switch_phase_err_deg	センサレス切り替え判断の角度誤差の閾値 [degree]
com_f4_opl2less_sw_time	センサレス切り替え時間 [s]
com_f4_phase_err_lpf_cut_freq	角度誤差に対する LPF カットオフ周波数 [Hz]
com_f4_ed_hpf_omega	ダンピング制御・HPF 係数
com_f4_ol_ref_id	オープンループ制御・d 軸電流指令値[A]
com_f4_id_up_time	d 軸電流上昇時間 [cnt]
com_f4_id_down_time	d 軸電流下降時間 [cnt]
com_f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
com_f4_id_up_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]
com_f4_ol_damping_zeta	ダンピング制御・減衰係数
com_f4_ol_damping_fb_limit_rate	ダンピング制御・フィードバック制限率
com_f4_id_hpf_time	脱調検知・d 軸電流 HPF 時定数[s]
com_f4_iq_hpf_time	脱調検知・q 軸電流 HPF 時定数[s]
com_f4_threshold_level	脱調検知・検知レベル[A]
com_f4_threshold_time	脱調検知・検知時間[s]
com_f4_timelead_1f/2f	トルク振動抑制・位相進み [rad]
com_f4_tf_lpf_omega	トルク振動抑制・TF 内部の LPF の固有周波数 [Hz]
com_f4_output_gain1f/2f	トルク振動抑制・繰り返し制御器への入力値に対するゲイン
com_u1_flag_trqvib_comp_learning	トルク振動抑制・学習機能 ON/OFF フラグ
com_f4_input_weight2	トルク振動抑制・入力重み 2
com_f4_input_weight1	トルク振動抑制・入力重み 1
com_f4_input_weight0	トルク振動抑制・入力重み 0
com_f4_suppression_th_1f/2f	トルク振動抑制・抑制目標
com_f4_abnormal_output_th_1f/2f	トルク振動抑制・TF 出力異常度の閾値

変数	説明
com_f4_restart_speed	フライングスタート・再起動判定速度[r/min]
com_f4_off_time	フライングスタート・短絡オフ時間[s]
com_f4_over_time	フライングスタート・超過判定時間[s]
com_f4_active_brake_time	フライングスタート・ブレーキ時間[s]
com_f4_on_current_th	フライングスタート・オン時間電流閾値[A]

*モータ停止時のみに反映可能

6.8 操作方法

RMW の Analyzer 機能を使用し、モータを操作する例を以下に示します。操作は、RMW 画面上の“Control Window”で行います。“Control Window”の詳細は、「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル」を参照してください。

(a) モータを回転させる

以下の操作を行いモータを回転させます

① “com_u1_system_mode”、“com_f4_ref_speed_rpm”の[W?]欄に“チェック”が入っていることを確認します。
② 指令回転速度を“com_f4_ref_speed_rpm”の[Write]欄に入力します。
③ “Write”ボタンをクリックします。（この時、”com_u1_system_mode”の欄は 0 のまま）
④ “Read”ボタンを押して現在の”com_f4_ref_speed_rpm”の[Read] 欄を確認します。
⑤ “com_u1_system_mode”の[Write]欄に“1”を入力します。
⑥ “Write”ボタンをクリックします。

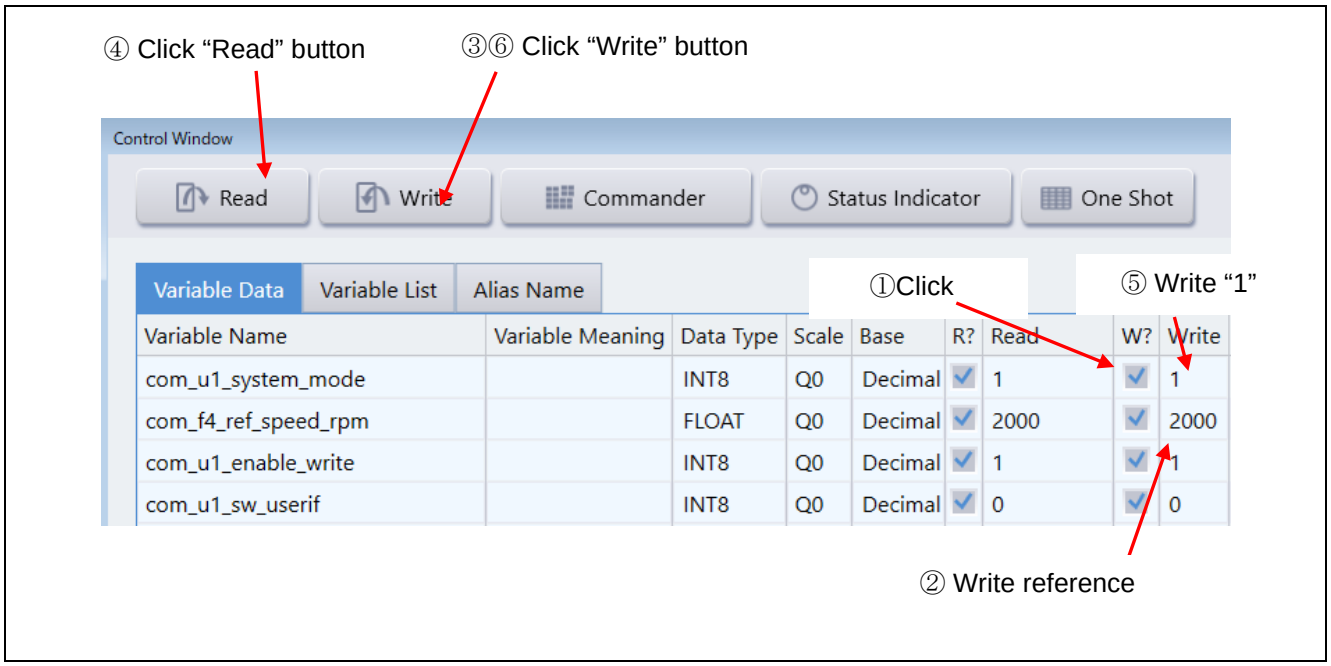


図 6-26 モータ回転の手順

(b) モータを停止させる

以下の操作を行う事で、モータを停止させることができます。

① “com_u1_system_mode”の[Write]欄に“0”を入力します。
② “Write”ボタンを押す。
③ モータが停止したことを確認します。

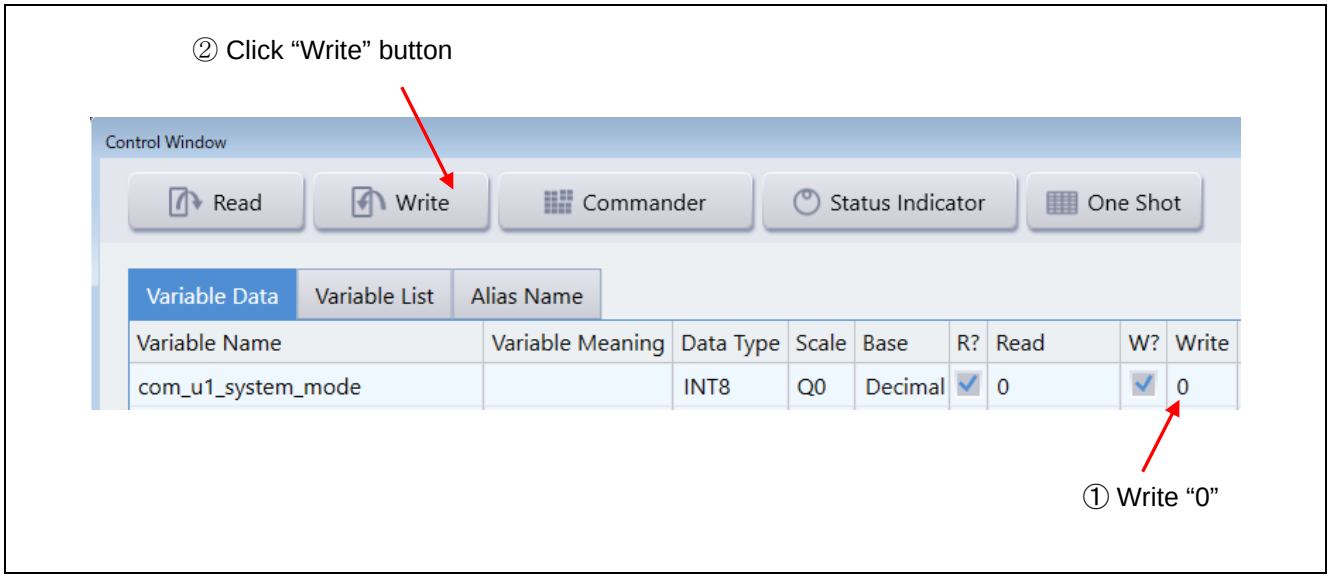


図 6-27　モータ停止の手順

(c)　止まってしまった（エラー）場合の処理

①　“com_u1_system_mode”の[Write]欄に“3”を入力します。
②　“Write”ボタンを押す。

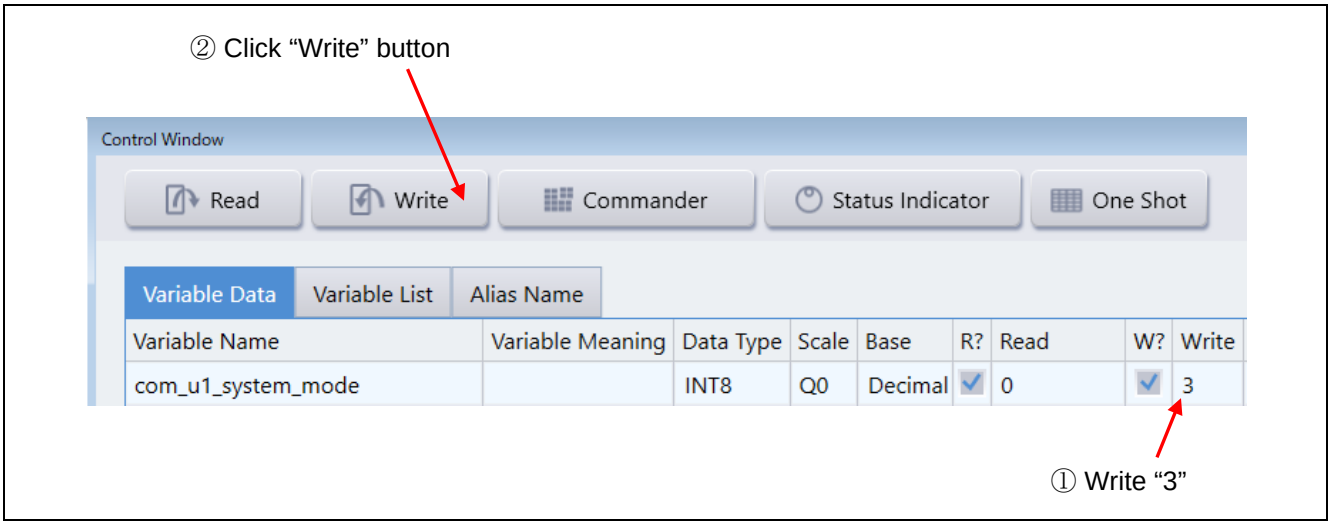


図 6-28　エラー解除の手順

表 6-5 エラーステータスの説明

値	エラー内容	割り当てられているマクロ名
0x0000	エラーなし	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_NONE
0x0001	HW 過電流エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_HW
0x0002	過電圧エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_VOLTAGE
0x0004	過速度エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_SPEED
0x0008,	ホール信号タイムアウトエラー(センサレスベクトル制御では発生しません)	MOTOR_ SENSORLESS_VECTOR_ERROR_HALL_TIMEOUT
0x0010	誘起電圧検出タイムアウトエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)	MOTOR_ SENSORLESS_VECTOR_ERROR_BEMF_TIMEOUT
0x0020	ホール信号パターンエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)	MOTOR_ SENSORLESS_VECTOR_ERROR_HALL_PATTERN
0x0040	誘起電圧検出パターンエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)	MOTOR_ SENSORLESS_VECTOR_ERROR_BEMF_PATTERN

0x0080	低電圧エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_LOW_VOLTAGE
0x0100	SW 過電流エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_SW
0x0200	脱調エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_STALL_DETECTED
0xffff	未定義エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_UNKNOWN

6.9 モータ停止・遮断方法

運転状態からモータを停止する場合には、以下に示す手順で行ってください。なお、緊急時は、②の DC24V の供給を最優先に停止させてください。

① 6.8(b)のモータ停止手順を行います。

② モータが停止するのを確認したら、直流安定化電源を操作し、DC24V の供給を停止します。

7. モータ制御アルゴリズム

7.1 概要

本サンプルプログラムのモータ制御アルゴリズムについて説明します。表 7-1 に、モータ制御機能を示します。

表 7-1 本サンプルプログラムのモータ制御機能

機能項目	機能の内容
制御方式	センサレスベクトル制御
電流検出方式	3 シャント
PWM 変調方法	空間ベクトル変調法（正弦波変調も選択可）
位置・速度推定方法	低速域：電流引き込み制御(OpenLoop) 中高速域：誘起電圧オブザーバ
制御モード	速度制御のみ
補償機能	・最大トルク/電流制御(MTPA)、弱め磁束制御 ・電圧誤差補償、サンプルディレイ補償 ・非干渉制御 ・トルク振動抑制 ・フライングスタート ・脱調検出

7.2　制御ブロック図

制御システム全体のブロック図の例を以下に示します。

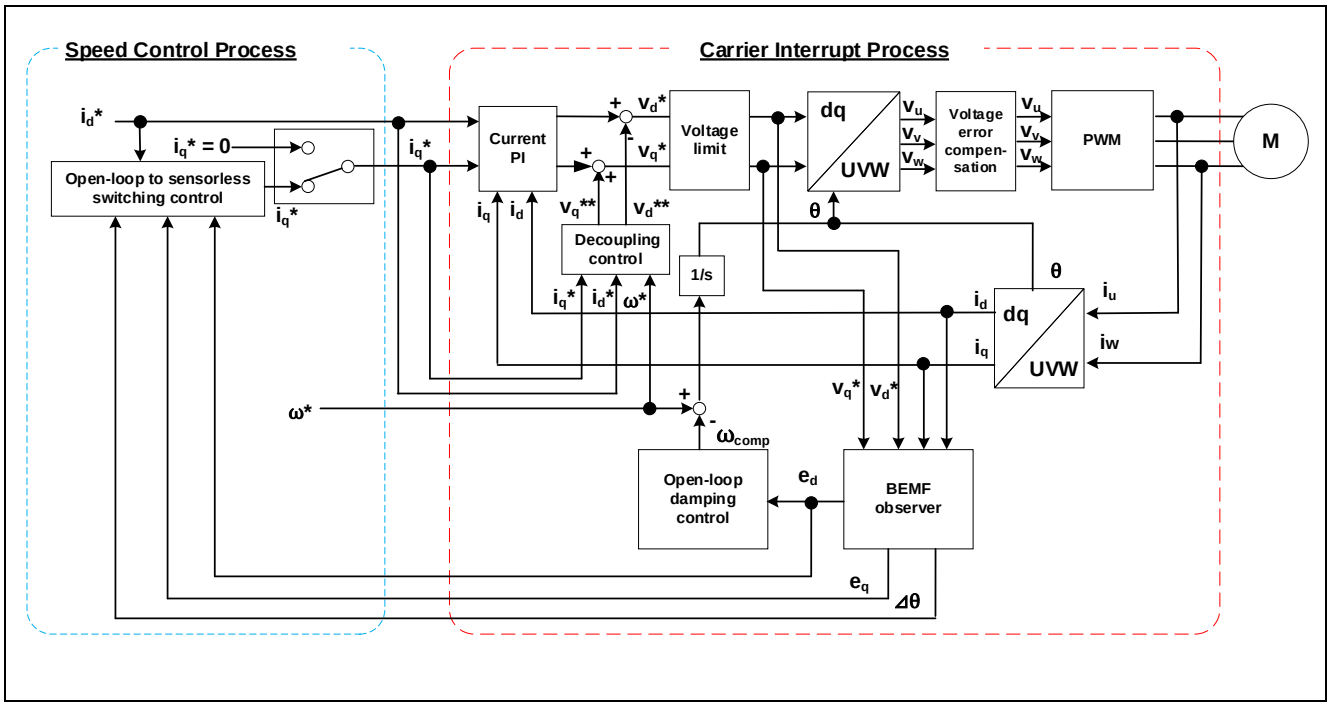


図 7-1　センサレスベクトル制御概略ブロック図(オープンループ制御時)

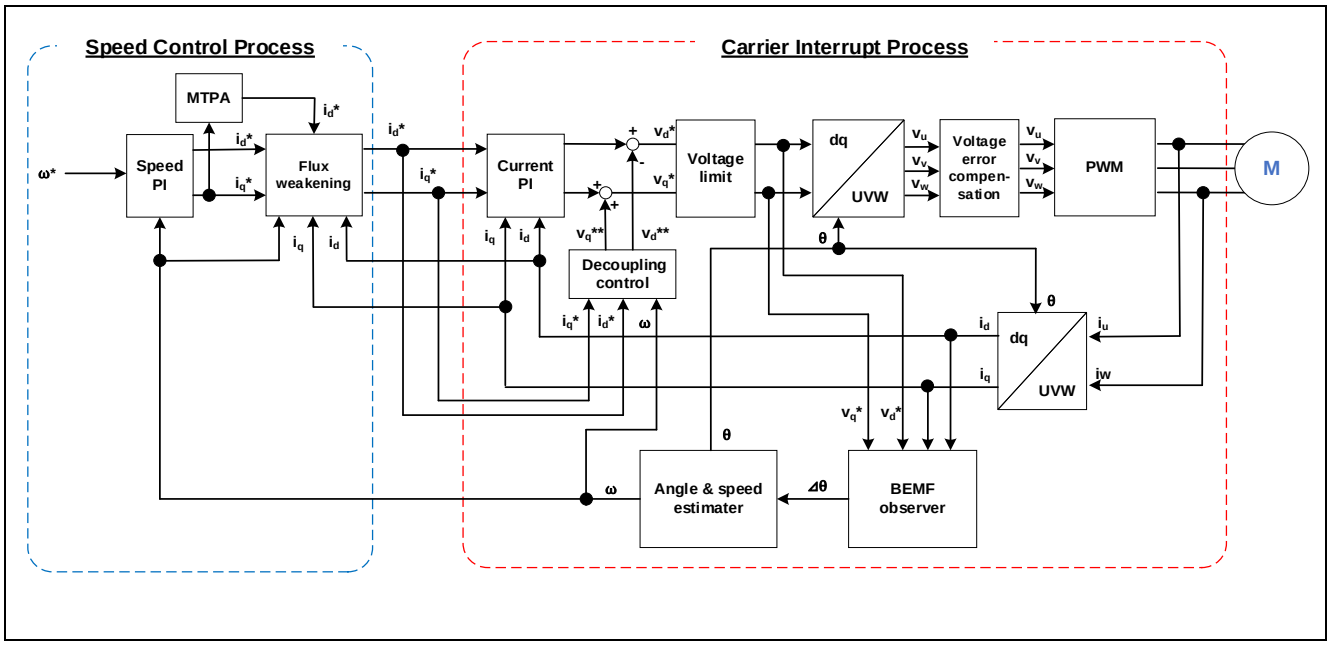


図 7-2　センサレスベクトル制御概略ブロック図(センサレス制御時)

7.3 速度制御機能

速度制御機能は、モータが速度指令に追従するよう、PI 制御を行います。速度指令値の入力を受けて、内部の速度調節器が速度推定値との偏差を基に q 軸電流指令値を出力します。また、サブモジュールの弱め磁束制御、最大トルク/電流制御(MTPA)を本モジュールから制御します。

速度推定値は、速度推定値に LPF を通した値を使用します。

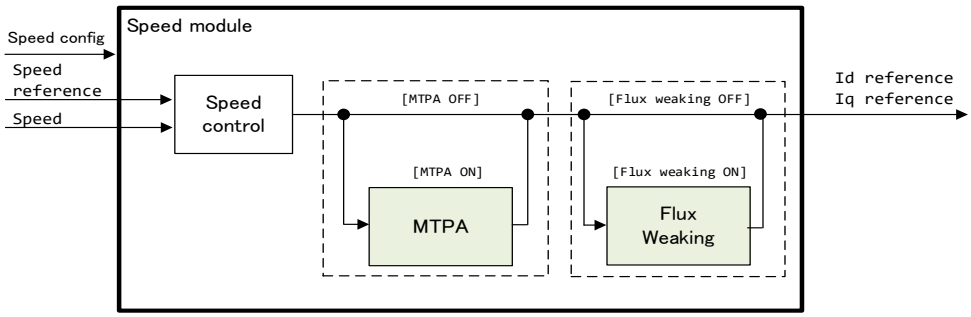


図 7-3 速度制御の機能ブロック図

7.4 最大トルク/電流制御(MTPA)

IPM モータのように突極性を有する PM モータは、最大トルク/電流制御(MTPA)を適用することができます。Id=0 制御では使用しないリラクタンストルクを有効利用することで、MTPA は単位電流あたりのトルクを最大に調整することができます。突極性を有さない SPM モータは構造的にリラクタンストルクが利用できないため、MTPA を使用できませんので、ご注意ください。Ld と Lq の値がほぼ等しい SPM モータ使用時は、必ず MTPA を無効としてください。無効としない場合、正常にサンプルプログラムが動作しません。本サンプルプログラムでは、Ld,Lq の値を監視して自動的な判断は行いません。

使用する式は、以下の式となります。速度調節器が出力する q 軸電流指令値 Iq*を入力として、d 軸電流指令値を求めることができます。

$$I^*_d = \frac{\Psi}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\left(\frac{\Psi}{2(L_q - L_d)}\right)^2 + I_q^{*2}}$$

Ψ: 磁束鎖交数[Wb], L_d, L_q: モータの d 軸インダクタンス及び q 軸インダクタンス[H]

7.5 弱め磁束制御

弱め磁束制御は、d 軸電流を負方向に制御することで、母線電圧で出力可能な電圧を PM モータの回転に比例して発生する誘起電圧(=ω Ψ)が超えてしまう条件下であっても、d 軸電流指令を負の値で増大させ、打ち消す制御を行います(図 7-4)。電圧飽和分を打ち消すことにより、加速に必要な q 軸電流指令を増やすことが可能となり、高速回転化および高速回転域での出力向上を実現します。

弱め磁束制御は、現在の電圧に対して、モータの回転速度が高くなり、電圧の余裕が難しくなった状態を自動的に検知して、Id*の値を負に増大させ、PM モータの電圧方程式に従って誘起電圧をキャンセルする制御を行います。

このため、まず、誘起電圧制限値を以下の計算式から求めます。R はモータの抵抗値、Ia は Id,Iq 検出値の二乗和(√(Id*Id+Iq*Iq))です。Vamax は、電圧誤差補償や変調処理であらかじめ計算している電圧ベクトルの最大値を使用します。

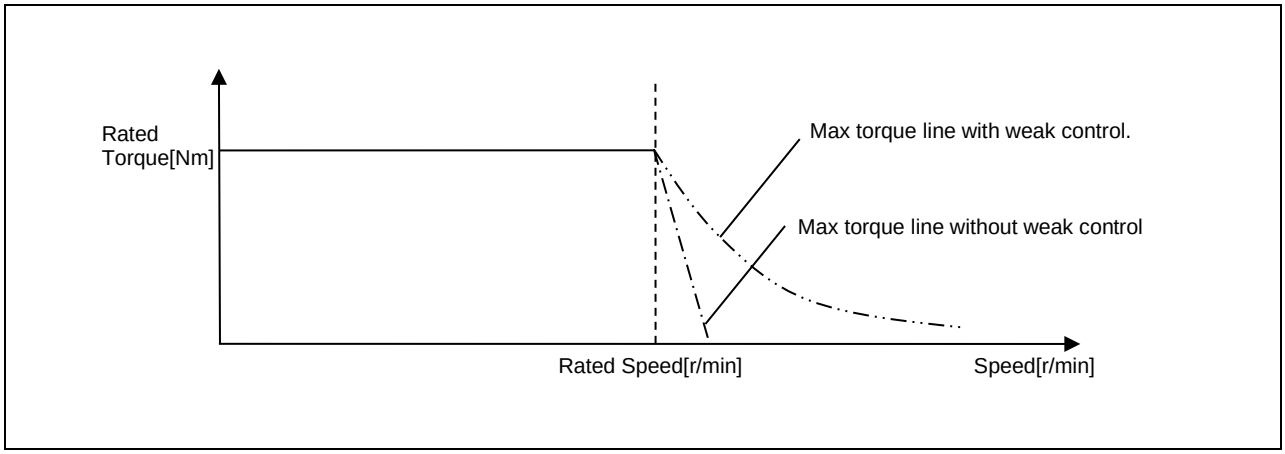


図 7-4　出力可能トルクと速度の関係例

$$V_{om} = V_{amax} - I_a R$$

V_{om}：誘起電圧制限値 [V]，V_{amax}：電圧ベクトルの最大値 [V]

I_a：電流ベクトルの大きさ [A]

図 7-5　誘起電圧制限値の計算式

$$I_d = \frac{-\psi_a + \sqrt{\left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 - \left(L_q I_q\right)^2}}{L_d}$$

$\because V_{om} = V_{amax} - I_a R$

V_{om}：誘起電圧制限値 [V]，V_{amax}：電圧ベクトルの最大値 [V]，I_a：電流ベクトルの大きさ [A]

図 7-6　弱め磁束制御における d 軸電流指令値の計算式

7.6　電流制御機能

電流制御機能は、入力された電流値からベクトル制御に必要な座標変換及びフィードバック制御を行い、PWM として出力する電圧を演算する機能です。また、サブモジュールの非干渉制御、サンプルディレイ補償、電圧誤差補償、BEMF オブザーバを本モジュールから制御します。モジュール構成図を図 7-7 に示します。

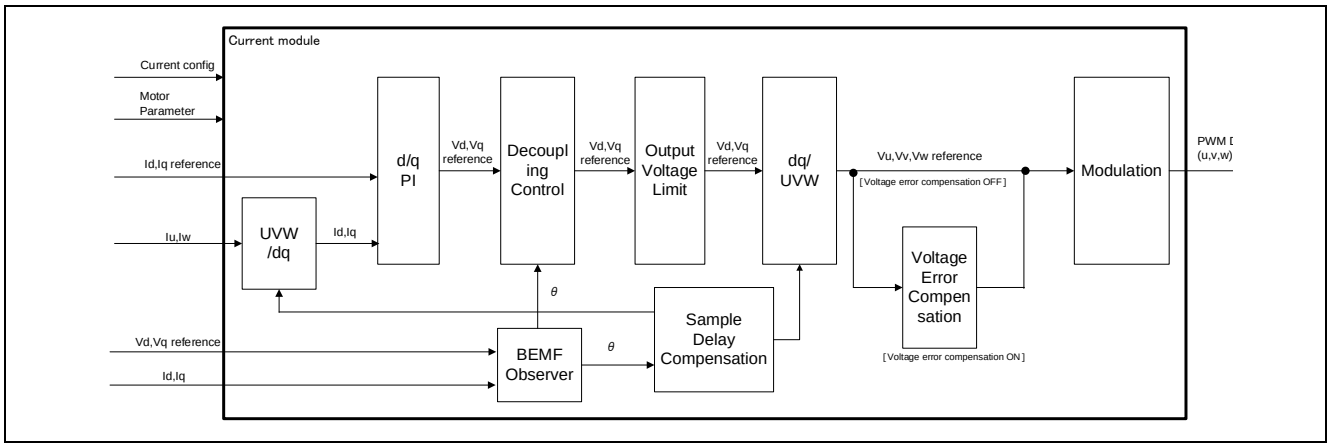


図 7-7　電流制御の機能ブロック図

7.7　非干渉制御

非干渉制御は、電流応答性の向上や PM モータにおいて d 軸・q 軸の間で電流が互いに干渉し合い、安定性を損なう事を抑制するために使用します。使用する式は、以下となります。一般的な PM モータの電圧方程式となります。

$$V_{d_dec}{}^{*} = RI_d{}^{*} - \omega L_q I_q{}^{*}$$
$$V_{q_dec}{}^{*} = RI_q{}^{*} + \omega L_d I_d{}^{*} + \omega\Psi$$

Id*,Iq*: 電流指令値[A], ω: 回転速度(電気角)[rad/s],R: モータの 1 次抵抗[Ω],

Ld,Lq: モータのインダクタンス[H], Ψ: モータの鎖交磁束数[Wb]

得られた電圧指令値 V_{d_dec}*と V_{q_dec}*は、PI 調節器から出力される電圧指令値 V_d*と V_q*に加算します。

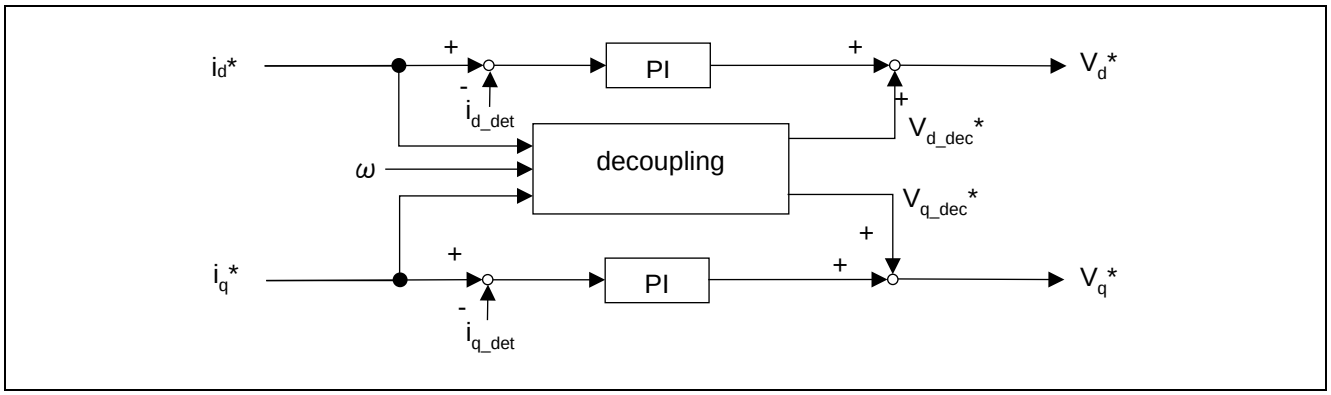


図 7-8　非干渉制御の機能ブロック図

7.8　脱調検出

脱調とは、モータの実際の磁極位置とモータ制御ソフトウェアが検知している磁極位置がずれてしまった状態で、速度の急激な低下や、過電流、不意の速度に回転するなどの大きな問題を引き起こします。

脱調検出機能は、脱調現象を特有の電流振動変化から検出し、保護停止させる機能を提供します。なお、本脱調検出機能は、全ての脱調現象を確実に検出できることを保証するものではありませんので、必要に応じて複数の保護手段を用いるようにしてください。

脱調検出では、Id 検出値または Iq 検出値の交流成分に着目し、ハイパスフィルタ(HPF)により抽出・積算して判定を行います。通常、dq 軸の電流検出値は、回転周波数と一致することにより直流量として現れますが、磁極位置が乖離した状態では、直流量ではなく交流量として現れることを利用しています。このため、失速した場合や内部で検知した速度よりも実速度が低い場合は、検出できない場合があります。本脱調検出機能がうまく働かない現象が発生した場合には、過電流保護機能などによって、カバーします。

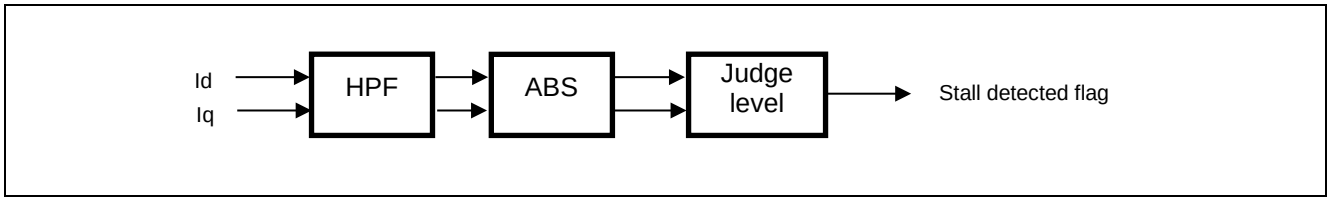


図 7-9　脱調検出の機能ブロック図

7.9　トルク振動抑制

7.9.1　概要

トルク振動抑制機能は、エアコン・冷蔵庫等のシングルロータリーやレシプロ型の圧縮機（コンプレッサ）で発生する、機械角 1 周期の周期トルク振動に対する抑制制御を目的としています。

圧縮機は、モータの回転により、冷媒ガスや空気等を圧縮するため、圧縮/排気/膨張/吸気の工程に応じた負荷変動を受けます。この負荷変動（＝トルク振動）により、モータ回転速度が変動してしまうことで、圧縮機出力の不安定化や、騒音や故障の原因となる機器の振動源を生じさせてしまいます。そこで、本機能を使用し、トルク振動によるモータ回転速度の変動を低減することで、「圧縮機出力の安定化」や「機器の振動低減」といった効果が期待できます。なお、本アルゴリズムでは、センサレスによる推定速度を用いてトルク振動を推定・打ち消す制御をフィードフォワード的に行います。そのため、パラメータの設定や圧縮機ならびに装置の構造等により、振動の低減効果が十分発揮できない場合があります。

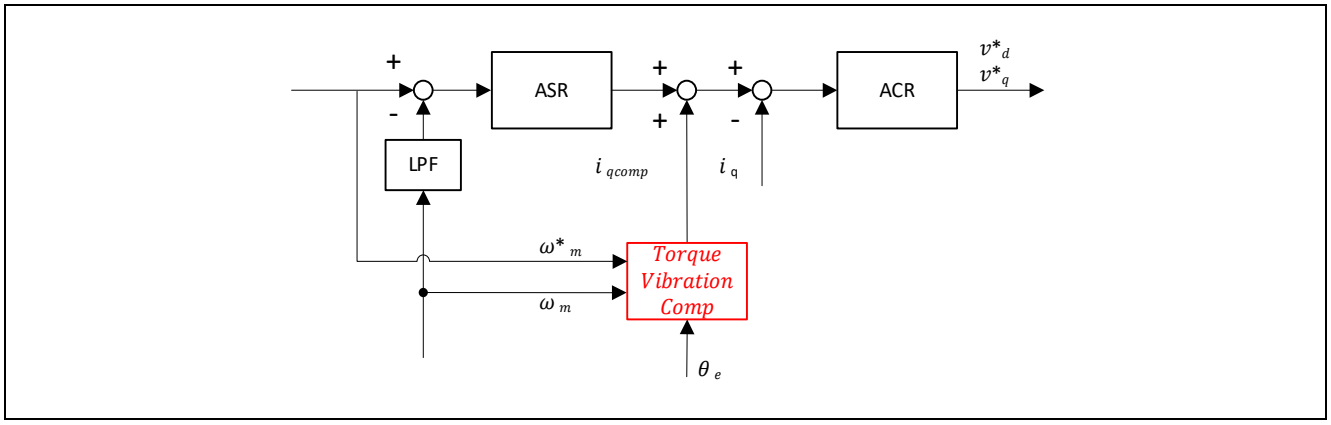


図 7-10　トルク振動抑制の機能ブロック図

7.9.2　原理

本サンプルソフトウェアで実装されているトルク振動抑制制御のアルゴリズムの概要について説明いたします。図 7-11 にトルク振動抑制制御の概要図を示します。シングルロータリーやレシプロ型の圧縮機のトルク振動は、その特性上、回転速度に比例し、機械角に依存していることから、回転周波数の周期性を有しています。（以下、機械角基準のモータ回転速度指令値を周波数換算したものを回転周波数と呼称します）そこで、圧縮機のトルク振動の影響を低減させるために、圧縮機のトルク振動を打ち消す補償信号を機械角に応じてフィードフォワードで q 軸電流指令値（トルク電流）に出力を行います。本サンプルソフトウェアでは、この補償信号を生成するために「トラッキングフィルタ」と「繰り返し制御」を採用しています。繰り返し制御は、入力信号の振動成分に振動成分 1 周期前の補償信号を足して出力します。（以下、この制御器を繰り返し制御器と呼称します）そのため、抑制により振動成分が減衰するとともに、入力も減衰するため、定常的な補償信号を学習することができます。ここで、振動成分とは速度変動中に含まれる抑制したい振動成分を指します。圧縮機の負荷特性は、回転周波数の整数倍で発生するため、回転周波数の 1 次成分や 2 次成分などが振動成分に該当します。したがって、速度変動成分をトラッキングフィルタ(TF)により振動成分毎に分解し、それぞれ繰り返し制御を行い、補償信号を合成してあげることで、圧縮機の負荷変動を打ち消す補償信号を得ることができます。繰り返し制御やトラッキングフィルタの詳細については、専門書を参考にしてください。

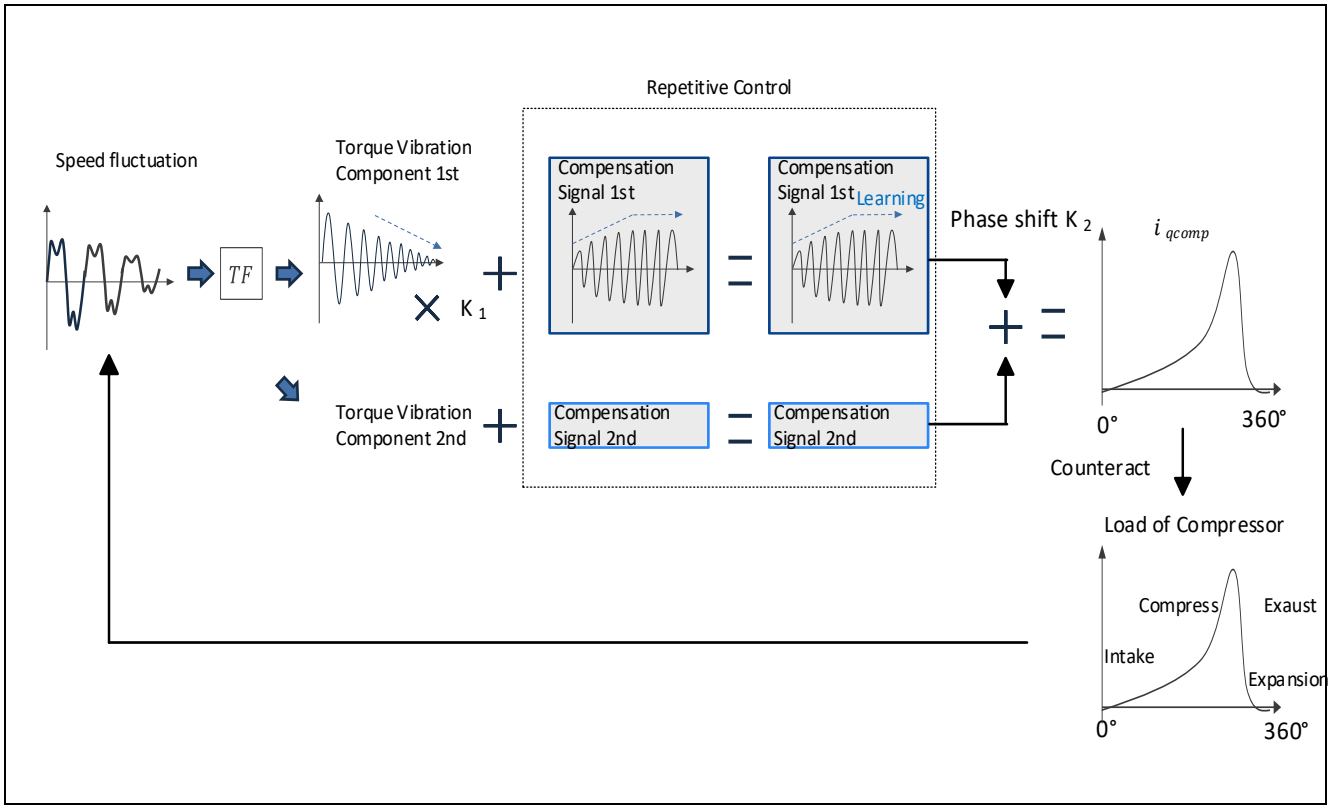


図 7-11　トラッキングフィルタと繰り返し制御を用いたトルク振動抑制の概要図

7.9.3　繰り返し制御器のマイコンへの実装

繰り返し制御器は、繰り返し制御器への入力に繰り返し制御器が持つ周期における 1 周期前の出力を足し合わせて出力する構造を有しています。そのため、1 周期前の補償信号を記憶しておく必要があります。マイコンではデータを離散的に扱うため、機械角 1 周期を N 個に分割した補償値テーブル（配列）を用意し、角度毎に補償値を格納することで、1 周期分の補償値を保持します。

表 7-2　補償値テーブル（N=256）

Index	Angle	補償値 (A)
0	0	0.01
1	1.41	0.02
2	2.81	0.02
・・・	・・・	・・・
254	357.18	-0.0005
255	358.59	0.0

本サンプルプログラムでは、表 7-2 に示したような補償値テーブルから補償信号を生成するために、2 つの実装方法を用意しています。１つ目は Look Up Table(LUT)方式と定義する、出力したい角度毎に補償値テーブルを読み出し、その値を補償信号として出力する方法です。2 つ目は、補償信号を磁極位置に関する関数と見立て、多項式近似を行い、多項式近似係数を取得することで補償信号を生成する Polynomial Approximation Techniques(PAT)方式です。PAT 方式は、LUT 方式と比較してメモリ数を節約して高分解能の補償信号を生成することができます。２つの方式の切り替えは、マクロにて切り替えが可能です。

(a)　テーブル参照方式（LUT）

Look Up Table（LUT）方式は、出力したい角度に対する補償値テーブルを参照し、補償信号として出力します。そのため、テーブルの大きさ N は、補償信号の機械角に対する分解能に相当します。

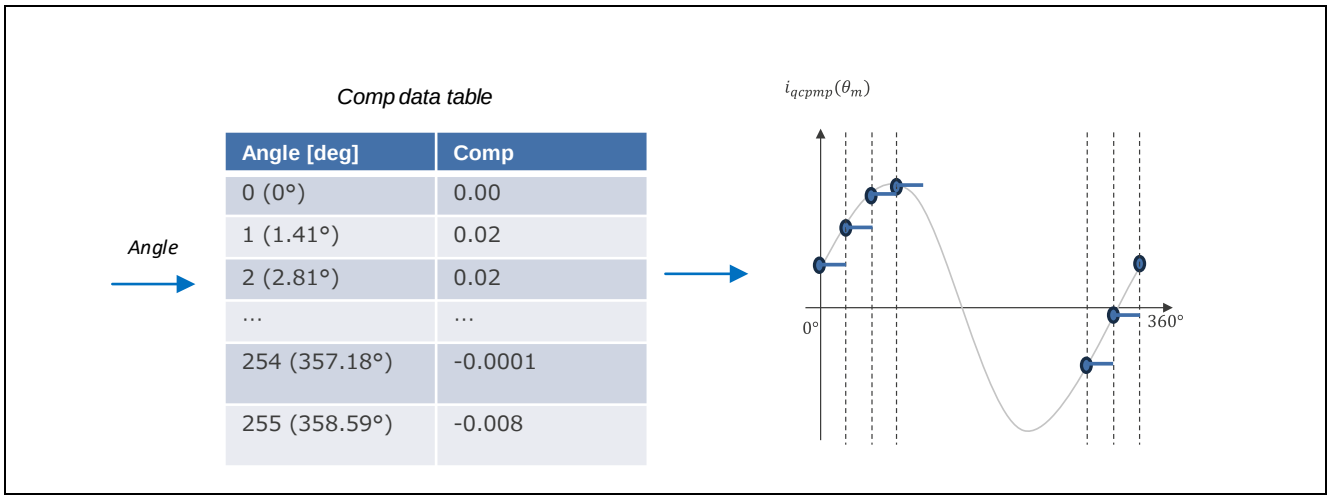


図 7-12　LUT 方式

(b)　多項式近似方式（PAT）

Polynomial Approximation Technics（PAT）方式とは、LUT 方式とは異なり補償値テーブルから補償信号を多項式近似により生成する方式です。本方式は、振動抑制効果を得ながら、RAM 量（配列数）を節約しつつ、さらに近似式による補完の働きにより高調波電流の影響を抑えることができます。

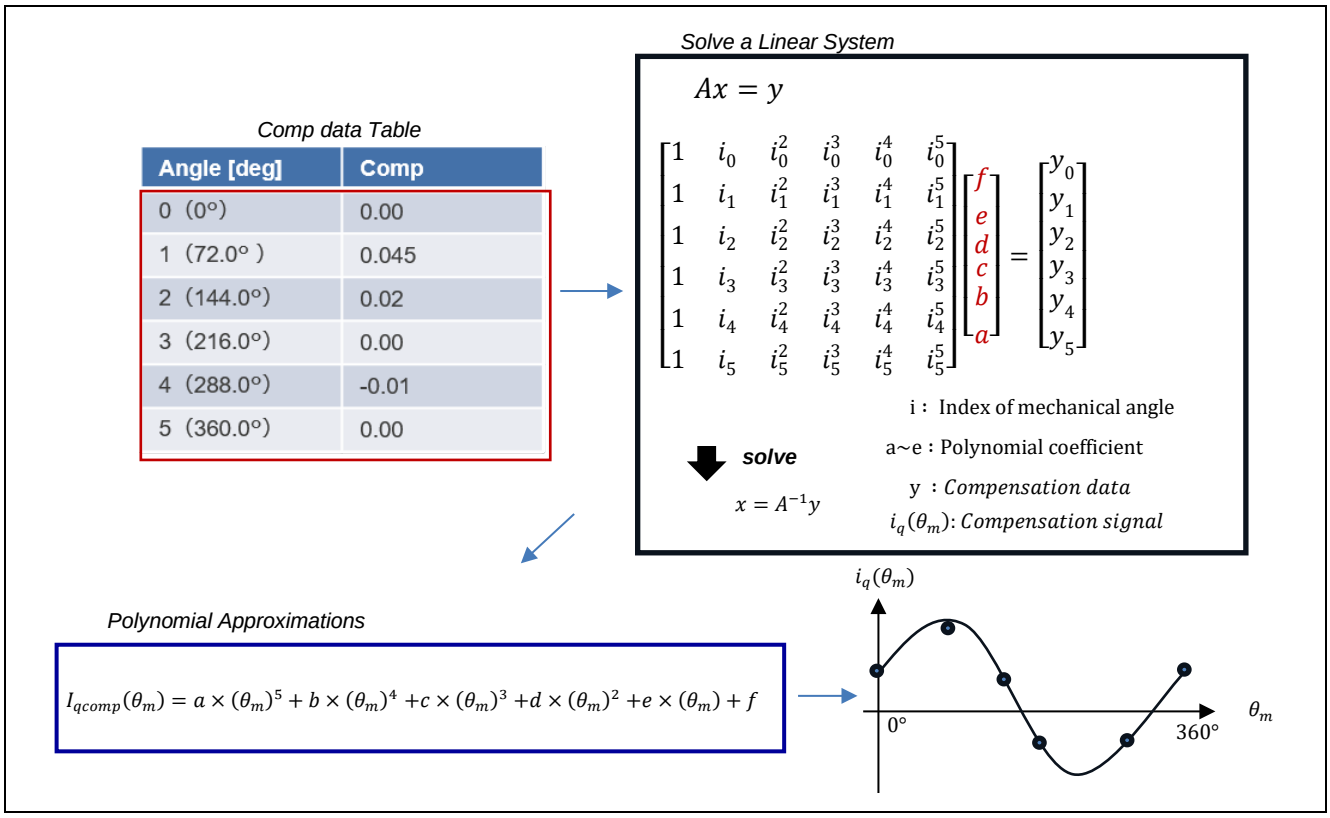


図 7-13　PAT 方式

7.9.4　進み補償

圧縮機のトルク振動は、回転周波数の整数倍で発生するため、複数の周波数成分を有しています。よって、速度変動に対する補償信号の位相特性が異なる場合があります。そこで、本サンプルソフトウェアでは、安定的なトルク振動抑制を行うため、位相進み補償を行った機械角（以下、参照機械角）で、補償信号の生成を行っています。具体的に LUT 方式では、現在の機械角から進み角度 K_2 だけオフセットを持たした参照機械角で補償値テーブルを参照して出力します。また、同様に PAT 方式では、現在の機械角から進み角度 K_2 だけオフセットを持たした参照機械角と多項式近似係数を用いて補償信号を生成しています。

7.9.5　学習機能

本サンプルソフトウェアで実装したトルク振動抑制制御は、モータ駆動中に補償信号の学習を行います。これは、低コスト性や耐環境性が求められる圧縮機では高価な位置センサの取り付けは避けたいため、絶対的な機械角が不明であり、駆動の都度に相対的な機械角を用いて補償信号の生成をする必要があるためです。図 7-14 に、本サンプルソフトウェアで実装したトルク振動抑制制御の制御ブロック図を示します。本サンプルソフトウェアでは、抑制対象の振動成分を、回転周波数の 1 次成分と 2 次成分に定めています。よって、補償信号生成のための繰り返し制御器を 2 つ並列に配置しております。また、システムを簡易にするため、速度変動から振動成分（TVC：Torque Vibration Component）の抽出器であるトラッキングフィルタは 1 つ用意しております。

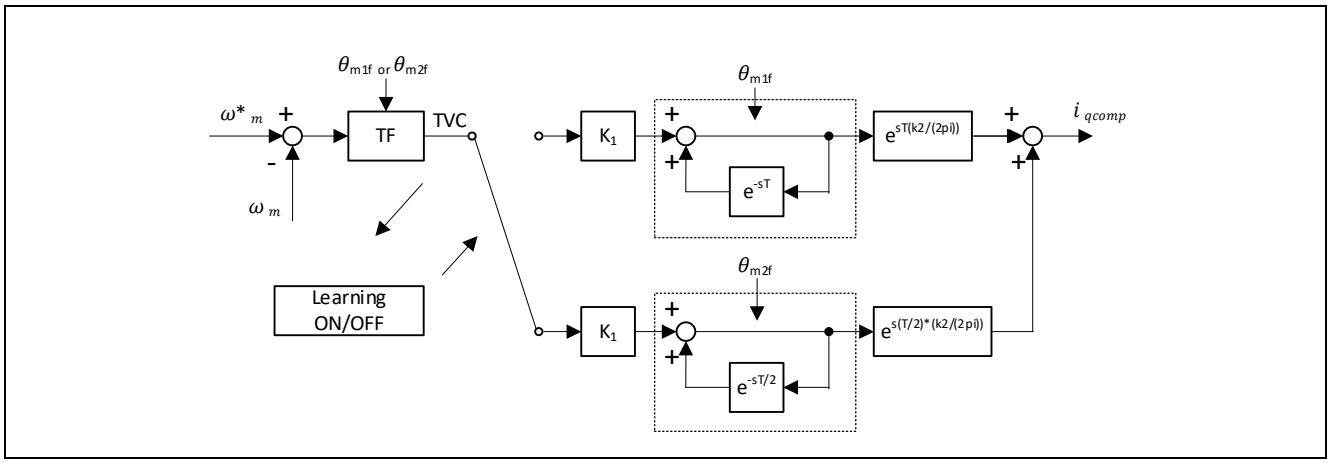


図 7-14　トルク振動抑制制御の制御ブロック図

モータ駆動中において補償信号の学習開始と学習終了および、補償対象の振動成分の切り替えの判断が必要になります。下記に学習開始条件と、学習終了条件を記載いたします。

- 学習開始条件：

  トラッキングフィルタ（TF）の出力である振動成分が定常的であること

- 学習終了条件：

次のいずれかの条件が満たされると学習は停止します。

(a)　振動成分の振幅を監視し、抑制目標に到達した場合

トラッキングフィルタ（TF）の出力の振動成分の振幅を監視し、事前に設定した抑制目標に達したら、学習を終了します。先述したように圧縮機では、低コスト性を重視するため、振動成分の減衰を評価するための速度センサや振動計、加速度計を取り付けることは避けたいです。したがって、本システムでは、抽出した振動成分の振幅から、抑制効果を判断しています。

(b)　トラッキングフィルタ（TF）の出力異常度が閾値を超えた場合

トラッキングフィルタ（TF）の出力異常度を監視し、事前に設定した閾値を超えたら、学習を終了します。TF は、簡易なシステムで所望の周波数成分を抽出することができますが、抽出したい周波数成分近傍に大きな成分を有すると、その周波数も抽出してしまう可能性があります。トルク振動抑制制御では振動成分を減衰させることから、その他の周波数成分に対する振動成分の相対的な大きさは、抑制と共に減少していきます。特に低速時の運転では、回転周波数の 1 次成分と 2 次成分の間隔が近くなるため、抑制により 1 次成分が減少すると 2 次成分の影響が TF 出力に出やすくなります。その結果、補償信号の誤学習が生じ、補償信号の位相によっては、補償値が積み上がることで過電流が生じる等の予期せぬ動作を引き起こす可能性があります。本サンプルソフトウェアでは、TF 出力における所望の振動成分に対する、その他の振動成分の影響を「TF 出力異常度」と定義しています。図 7-15 に、低速時の 1 次成分の補償信号学習中における TF 出力異常度と、TF 出力および補償信号の様子を示します。この TF 出力異常度は、振動成分の抑制と共に増加します。そして、TF 出力異常度が 1.0 を超えて学習を継続すると、TF 出力において学習対象でない 2 次成分が支配的になります。したがって、この TF 出力異常度が 1.0 を超える前に学習を終了させることで、補償信号の誤学習を防ぐことができます。

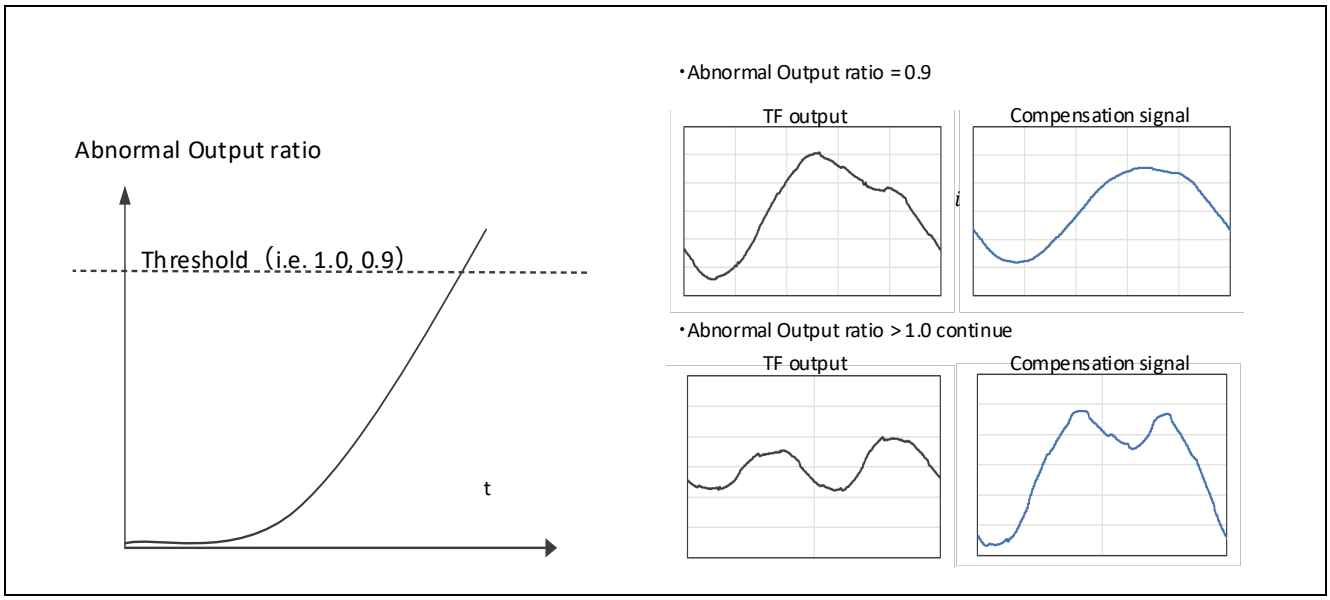


図 7-15　抑制中の TF 出力異常度および、TF 出力、補償信号

表 7-3 に、トルク振動抑制制御におけるステータス、表 7-4 にステータス変化を生じさせるアクションを示しています。また、図 7-16 にはトルク振動抑制制御のステータスによるモータ回転速度の変動抑制のイメージ図を示しています。

表 7-3　トルク振動抑制制御のステータス一覧

STATE	説明	補償信号の出力状態
IDLE	トルク振動抑制制御機能 OFF 状態	なし
1F STANDBY	回転周波数 1 次成分の抽出待ち	なし
1F LEARNING	回転周波数 1 次成分の補償信号の学習中	回転周波数の 1 次成分
2F STANDBY	回転周波数 1 次成分の補償信号の学習終了 回転周波数 2 次成分の抽出待ち	回転周波数の 1 次成分
2F LEARNING	回転周波数 1 次成分の補償信号の学習終了 回転周波数 2 次成分の補償信号の学習中	回転周波数の 1 次成分　+　2 次成分
COMPLETE	補償信号の学習終了	回転周波数の 1 次成分　+　2 次成分

表 7-4　トルク振動抑制制御のアクション一覧

ACTION	説明
RESET	トルク振動抑制制御機能 OFF 状態にする。 補償信号および、補償値テーブルをリセットする。
START	トルク振動抑制制御機能を ON
LEARNING_ON	補償信号の学習開始条件を満たしたことによる、学習開始
LEARNING_OFF	補償信号のいずれかの学習終了条件を満たしたことによる、学習終了

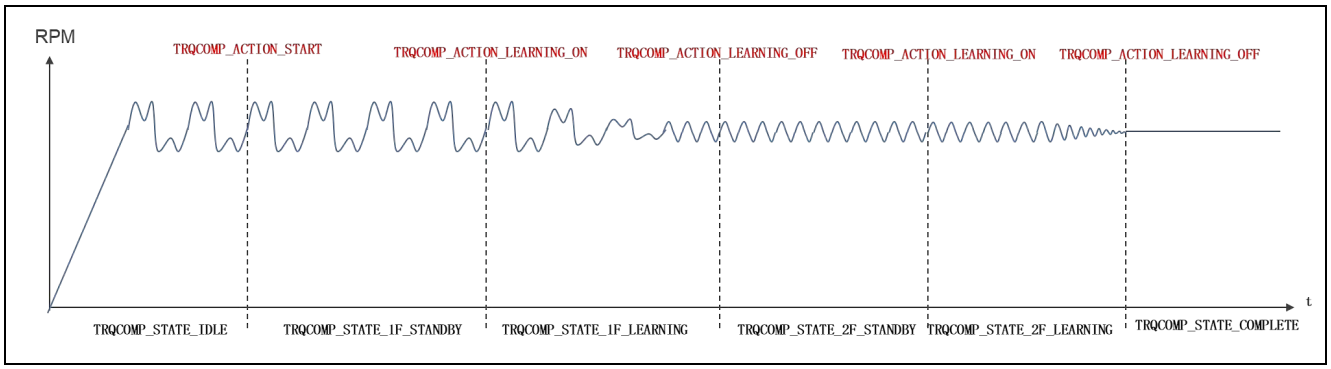


図 7-16　トルク振動抑制制御の状態遷移の様子

7.10 フライングスタート

フライングスタートは、モータが回転しているときにインバータが停止(全スイッチ OFF 状態)し、モータが回転している状態から、モータの回転速度及び回転磁極位置を推定しインバータを起動する機能です。

インバータを停止状態から再起動する際、三相下アームの短絡(図 7-18 を参照)を 2 回行い、回転子の誘起電圧によって流れる短絡電流ベクトルを用いて初期回転速度及び磁極位置の推定を行います。図 7-17 にフライングスタートの処理の内容を示します。t1~t2 期間及び t3~t4 期間に、インバータの 3 相下アーム素子を同時にオンし、t2 及び t4 のタイミングにおける回転電流ベクトルの位相から回転速度及び磁極位置を演算します。また t5 のタイミングで、演算した初期回転速度及び磁極位置を用いて位置・速度推定系及び速度 PI 制御系に初期値を設定しインバータの起動処理を行います。

本アルゴリズムでは、再起動可能な回転速度は、BEMF オブザーバ運転が可能な速度と定義しています。推定した回転速度が BEMF オブザーバの運転領域以外の場合、三相下アームを一定期間導通させることで、ブレーキトルクを発生させてモータの回転を停止させてから通常の起動処理を行います。

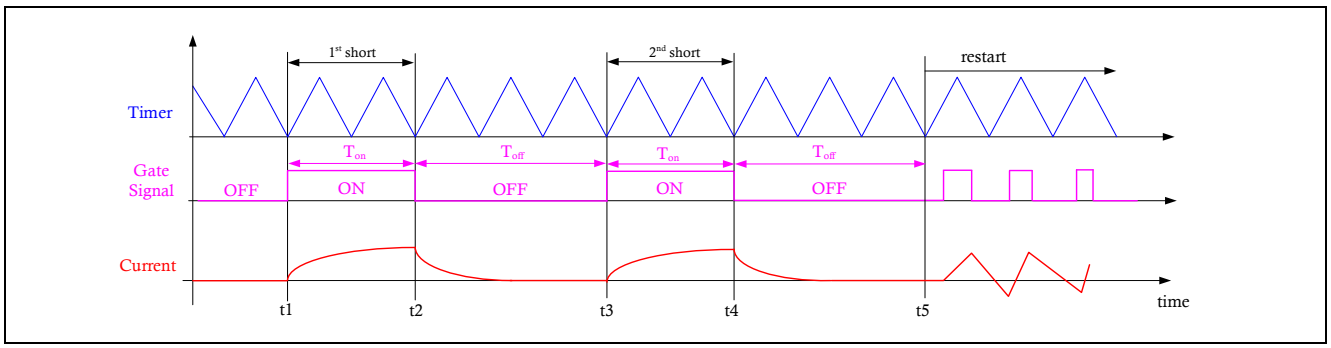


図 7-17　フライングスタートの動作波形例

(1) 回転速度検出

図 7-18 に 2 回短絡を行った時の回転電流ベクトルの位相関係を示します。検出した 3 相電流 iu, iv, iw から 2 相電流 iα, iβ を演算し、1 回目と 2 回目短絡時における電流ベクトルの位相角 θ1 及び θ2 を三角関数(atan2)から演算します。また電流ベクトル位相角 θ1 と θ2 及びパルスオン時間 Ton、オフ時間 Toff を用いて、式(7.10.1)を用いて回転電気角速度 ω を計算します。

$$\omega = \frac{\theta_2 - \theta_1}{T_{on} + T_{off}} \qquad \text{式(7.10.1)}$$

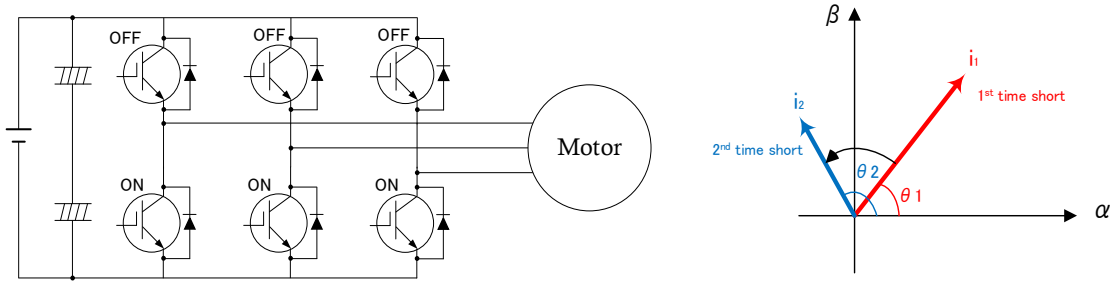


図 7-18　2 回短絡時の電流ベクトルの軌跡

2 回短絡した時の回転電流ベクトルがπ(180 度)以上回転した際、回転方向の区別ができないため(Ton+Toff)は以下の条件を満たす必要があります。下式において ω_{max} は最高回転電気角速度です。

$$Ton + Toff < \pi / \omega_{max} \qquad \text{式(7.10.2)}$$

(2) 磁極位置検出

dq 軸回転座標系における電圧方程式を式(7.10.3)に示します。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \psi \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{式(7.10.3)}$$

ここで v_d,v_q は dq 軸電圧、i_d,i_q は dq 軸電流、R は巻線抵抗、L_d,L_q は dq 軸インダクタンス、ψは回転子の誘起電圧係数、p は微分演算子です。上式において、三相短絡($v_d = 0$,$v_q = 0$)した時、式(7.10.4)となります。但し、電気時定数 L_q/R に対して短絡時間 Ton が十分短いとして R≒0.0 と近似します。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \psi \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{式(7.10.4)}$$

上式から、初期電流 i(0)=0 の条件でラプラス変換を用いて時刻 T における電流ベクトル i(T)を計算すると式(7.10.5)となります。

$$i(T) = \begin{bmatrix} i_d(T) \\ i_q(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\psi}{L_d}(1 - \cos\omega T) \\ -\frac{\psi}{L_q}\sin\omega T \end{bmatrix} \qquad \text{式(7.10.5)}$$

回転角速度 ω 及び短絡時間 Ton を用いて、dq 軸回転座標系における電流ベクトル位相角θ_aを下式で演算します。

$$\theta_a = \mathrm{atan2}\left(\frac{i_q}{i_d}\right) = \mathrm{atan2}\left(\frac{-\frac{\psi}{L_q}\sin\omega T_{on}}{-\frac{\psi}{L_d}(1-\cos\omega T_{on})}\right) = \mathrm{atan2}\left(\frac{L_d \sin\omega T_{on}}{L_q(1-\cos\omega T_{on})}\right) \quad \text{式(7.10.6)}$$

ベクトル制御系における回転子の dq 座標系は、αβ 座標系の α 軸（U 相）を基準にする回転座標系であるため、d 軸の磁極位置θ_rを最終的には下式のように演算します。

$$\theta_r = \theta_i - \theta_a = \mathrm{atan2}\left(\frac{i_\beta}{i_\alpha}\right) - \mathrm{atan2}\left(\frac{i_q}{i_d}\right) \quad \text{式(7.10.7)}$$

図 7-19 に 2 回目短絡した時の回転電流ベクトルと磁極位置の位相関係を示します。θ_aは d 軸を基準にした電流ベクトル Ia の位相角、θ_iは α 軸を基準にした電流ベクトル Ia の位相角です。

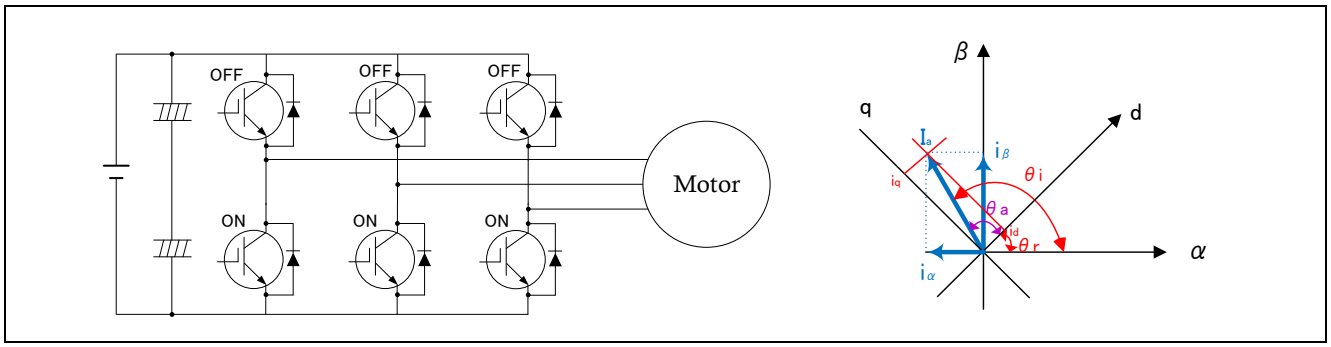


図 7-19　2 回目短絡時の電流ベクトルと磁極位置の関係

(3) 制御パラメータ設計

Ton,Toff 時間に関するパラメータは以下の方針に従って設計してください。

表 7-5　フライングスタートの制御パラメータ設計

[Ton+Toff 最大時間]	式(7.10.1)を用いて(Ton+Toff)max と回転速度との関係を説明します。最高回転速度 4000r/min における(Ton+Toff)max は、電気角 0.5 回転あたりにかかる時間と等しく、3.75ms となります。よって、全回転速度域において(Ton+Toff)は 3.75ms 以下をなるように設計します。このため、ターゲットモータ及び最高回転速度仕様に応じて本パラメータを決定してください。
[Ton 時間]	10.15 章の SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_CURRENT_TH を参照ください。
[Toff 時間]	10.15 章の SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OFF_TIME_SEC を参照ください。

7.11 センサレス機能

7.11.1 概要

ゼロ速～低速域（600r/min 以下）では電流引き込み制御による OpenLoop 始動を行います。中高速領域(600r/min 以上)では誘起電圧オブザーバによる磁極位置推定方法を組み合わせることで、センサレスベクトル制御を実現しています。

オープンループ制御では脱調の恐れがあるため、定格の半分以下に負荷制限を行ってください。また、オープンループ制御時は、始動する際に電気角で最大 180°程度、モータが回転する場合があります。

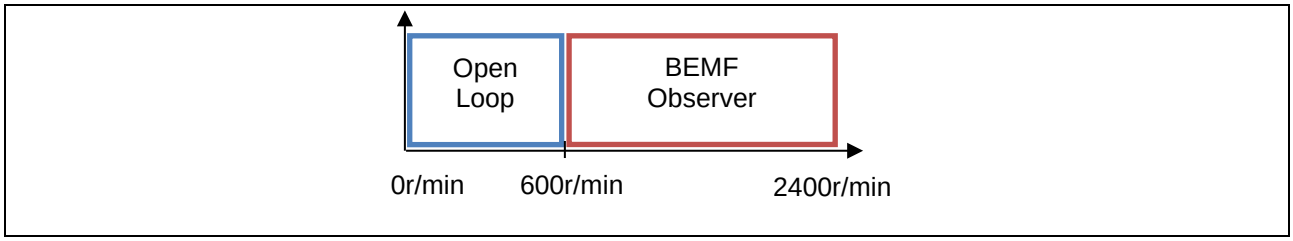


図 7-20　速度と対応するセンサレス制御のアルゴリズム

7.11.2 電流引き込み制御（OpenLoop）

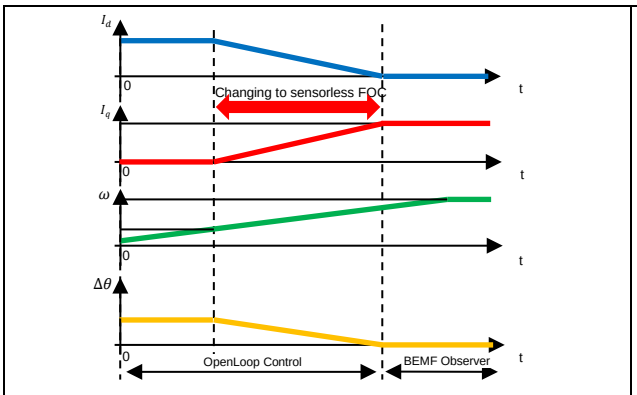
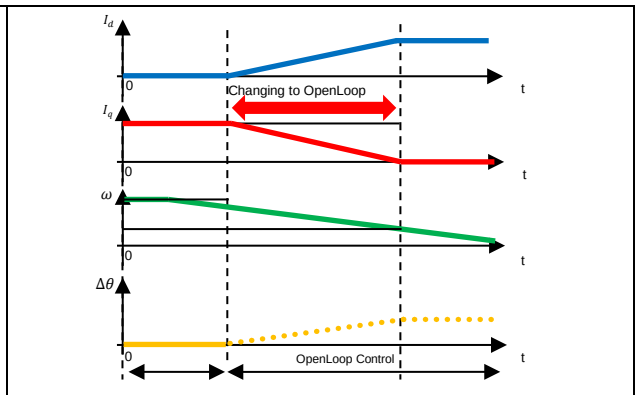
(a) 概要

低速域では、d 軸に＋方向の電流を流し、強制励磁して電流引き込み制御を行います。オープンループ制御となるため、定格負荷に対して数十パーセントの負荷しかかけることができません。定格負荷をかけるためには、後述する中高速域で使用する BEMF オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御（電流フィードバック制御）のモードで使用ください。

(b) 中高速との切り替え処理

モータ始動後、誘起電圧が十分に推定可能な速度に到達したところで、センサレス制御(速度クローズドループ制御)に移行します。ただしオープンループ制御時は、位相誤差によりセンサレス制御移行時に電流及び速度のハンチングが起こる場合があります。そのため、位相誤差Δθから負荷トルクを推定し、表 7-5 のようなセンサレス制御への切り替え処理を行います。低速域から中高速域にセンサレスのアルゴリズムが切り替わる際、d 軸電流指令と q 軸電流指令を調整し、電流変動を抑えるように状態シーケンスを動作させます。逆に中高速域から低速域にセンサレスのアルゴリズムが切り替わる速度に達した場合は、オープンループでの動作に切り替わります。切り替え速度は、加速時と減速時で切り替えが頻繁に行われないよう、十分に離す必要があります。これらの速度は、後述のパラメータで調整することができます。これにより制御切り替え時の電流及び速度のハンチングを低減することができます。

表 7-6　センサレス切り替え処理時の各物理量の挙動イメージ（加速および減速時）

	
加速時	減速時

7.11.3 中高速域センサレスアルゴリズム

中高速域では、誘起電圧オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御を用いて制御を行います。誘起電圧オブザーバのアルゴリズムは、本サンプルプログラムのベースとなっている、アプリケーションノート「永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 Evaluation System for BLDC Motor 用 (R01AN6307)」の 5.6 誘起電圧オブザーバ（電流制御モジュール）にて詳細な説明が記載されています。

7.12 サンプルディレイ補償

UVW の三相電圧指令を生成する際に、推定した角度から任意の制御周期分、進めた角度で二相三相変換を行います。この処理により、制御結果反映までの位相進みを考慮することができ、制御の安定性を改善することができます。

指令演算中、モータの回転が進むことで、角度は常にずれが生じます。このずれを指令演算時間が一定であることを利用し、進む角度を前回の角度移動量から補間する機能となります。

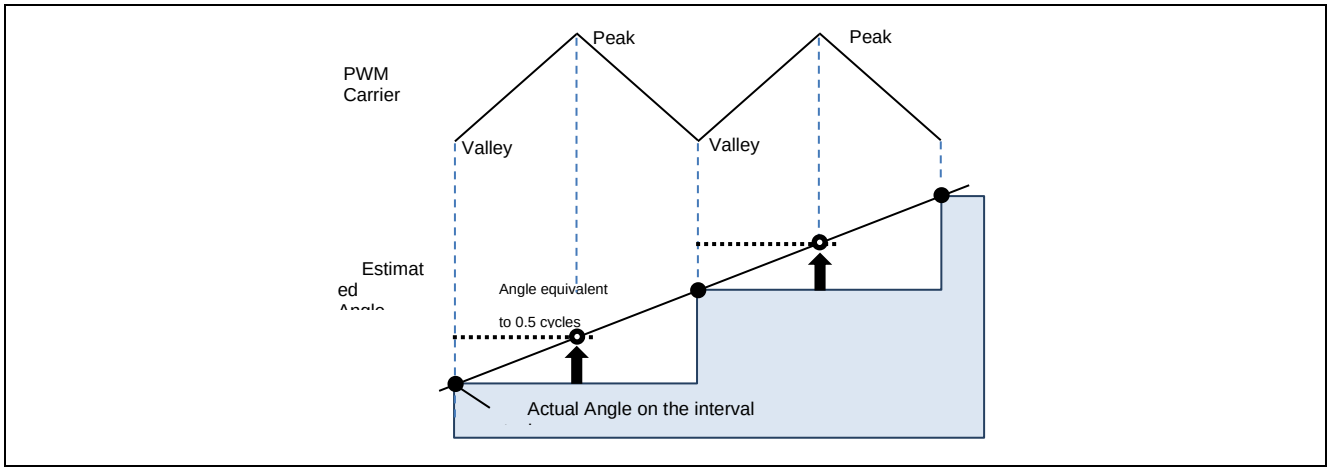


図 7-21　PWM キャリア周期で進む角度量の例

7.13 電圧誤差補償

電圧形 PWM インバータでは、上下アームのスイッチング素子間の短絡を防止するために、上下アーム 2 つの素子が同時にオフとなるデッドタイムを設けています。そのため電圧指令値と実際にモータに印加される電圧には誤差が生じ、制御精度が悪化します。そこでその誤差を低減するため、電圧誤差補償を実装します。

電圧誤差の電流依存性は、電流(向きと大きさ)とデッドタイム、使用するパワー素子のスイッチング特性に依存し、下記のような特性を持ちます。電圧誤差補償では、下記電圧誤差と逆の電圧パターンを電流に応じて電圧指令値に補償します。

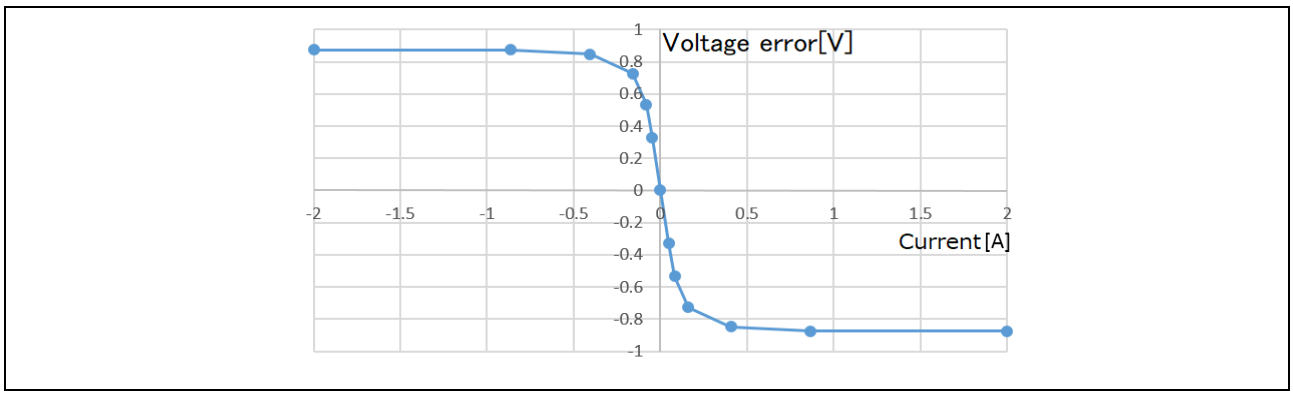


図 7-22　電圧誤差の電流依存性(一例)

7.14 PWM 変調方式

サンプルプログラムでは、モータへの入力電圧はパルス幅変調（PWM）によって生成します。本モジュールでは、PWM Duty 比の算出を行います。また、電圧利用率を上げるために、変調を行った電圧を出力できます。電流制御モジュールの API を通して変調の動作を設定します。本サンプルプログラムでは、2 種類のパルス幅変調駆動方式から選択できます。

(a) 正弦波変調(MOD_METHOD_SPWM)

永久磁石同期モータのベクトル制御において、一般的に所望の各相電圧指令値は正弦波状に生成します。実際にモータに印加される電圧のインバータ母線電圧に対する電圧利用率は、線間電圧換算で最大 86.7[%]となります。正弦波変調法を使用すると電圧利用率が 100%使用できないため、インバータの性能を最大限に活用できない場合があります。

本変調法では、変調率 m を以下のように定義しています。

$$m = \frac{V}{E}$$

m：変調率　　V：指令値電圧　　E：インバータ母線電圧

(b) 空間ベクトル変調相当(MOD_METHOD_SVPWM)

正弦波変調法では、そのまま PWM 生成のための変調波として使用すると、実際にモータに印加される電圧のインバータ母線電圧に対する電圧利用率は線間電圧換算で最大 86.7[%]となります。

そこで、下記式にあるように各相電圧指令値の最大値と最小値の平均値を算出し、それらを各相電圧指令値から減算したものを変調波として使用します。その結果、変調波の最大振幅は$\sqrt{3}/2$倍となり、線間電圧はそのままに電圧利用率は 100[%]となります。この方式は空間ベクトル変調と等価の結果が得られます。

$$\begin{pmatrix} V_u' \\ V_v' \\ V_w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_u \\ V_v \\ V_w \end{pmatrix} + \Delta V \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\because \Delta V = -\frac{V_{max}+V_{min}}{2},\ V_{max} = max\{V_u, V_v, V_w\},\ V_{min} = min\{V_u, V_v, V_w\}$$

V_u, V_v, V_w：U,V,W 相電圧指令値

V_u', V_v', V_w'：PWM 生成用 U,V,W 相電圧指令値(変調波)

変調率 m を以下のように定義します。

$$m = \frac{V'}{E}$$

m：変調率　V'：PWM生成用相電圧指令　E：インバータ母線電圧

8. ハードウェア仕様

8.1 ユーザインタフェース

本システムのボードユーザインタフェース一覧を表 8-1 に示します。

表 8-1 ボードユーザインタフェース

項目	インタフェース部品	機能
回転速度	可変抵抗器 (VR1)	回転速度指令値入力
START/STOP	トグルスイッチ (SW1)	モータ回転開始／停止指令
ERROR RESET	プッシュスイッチ (SW2)	エラー状態からの復帰指令
LED1	オレンジ色 LED(LED1)	・モータ回転時　：点灯 ・モータ停止時　：消灯
LED2	オレンジ色 LED (LED2)	・エラー検出時　：点灯 ・通常動作時　：消灯
LED3	オレンジ色 LED (LED3)	未使用
RESET	プッシュスイッチ (RESET1)	システムリセット

サンプルソフトウェアの端子インタフェースを表 8-2、表 8-3、表 8-5 に示します。

表 8-2 端子インタフェース[1/3]

機能	RA6T2	RA6T3	RA4T1
インバータ母線電圧測定	PA07 / AN007	P004 / AN004	P004 / AN004
回転速度指令値入力 (VR1)	P000 / AN016	P005 / AN005	P005 / AN005
START/STOP トグルスイッチ (SW1)	PD04	P304	P304
ERROR RESET プッシュスイッチ (SW2)	PD07	P200	P200
LED1 点灯/消灯制御	PD01	P113	P113
LED2 点灯/消灯制御	PD02	P106	P106
U 相電流測定	PA04 / AN004	P000 / AN000	P000 / AN000
V 相電流測定	PA02 / AN002	P001 / AN001	P001 / AN001
W 相電流測定	PA00 / AN000	P002 / AN002	P002 / AN002
PWM 出力(U_p)	PB04 / GTIOC4A	P409 / GTIOC1A	P409 / GTIOC1A
PWM 出力(V_p)	PB06 / GTIOC5A	P103 / GTIOC2A	P103 / GTIOC2A
PWM 出力(W_p)	PB08 / GTIOC6A	P111 / GTIOC3A	P111 / GTIOC3A
PWM 出力(U_n)	PB05 / GTIOC4B	P408 / GTIOC1B	P408 / GTIOC1B
PWM 出力(V_n)	PB07 / GTIOC5B	P102 / GTIOC2B	P102 / GTIOC2B
PWM 出力(W_n)	PB09 / GTIOC6B	P112 / GTIOC3B	P112 / GTIOC3B
過電流検出時の PWM 緊急停止入力	PC13 / GTETRGD	P104 / GTETRGB	P104 / GTETRGB

表 8-3 端子インタフェース[2/3]

機能	RA8T1	RA8T2
インバータ母線電圧測定	P008 / AN008	P007 / AN007
回転速度指令値入力 (VR1)	P014 / AN007	P015 / AN015
START/STOP トグルスイッチ (SW1)	PA15	PA00
ERROR RESET プッシュスイッチ (SW2)	PA13	PA07
LED1 点灯/消灯制御	PA12	P614
LED2 点灯/消灯制御	PA14	PA15
U 相電流測定	P004 / AN000	P006 / AN006
V 相電流測定	P005 / AN001	P008 / AN008
W 相電流測定	P006 / AN002	P010 / AN010
PWM 出力(U_p)	P115 / GTIOC5A	P605 / GTIOC8A
PWM 出力(V_p)	P113 / GTIOC2A	P603 / GTIOC7A
PWM 出力(W_p)	P300 / GTIOC3A	P612 / GTIOC9A
PWM 出力(U_n)	P609 / GTIOC5B	P604 / GTIOC8B
PWM 出力(V_n)	P114 / GTIOC2B	P602 / GTIOC7B
PWM 出力(W_n)	P112 / GTIOC3B	P613 / GTIOC9B
過電流検出時の PWM 緊急停止入力	P613 / GTETRGA	P112 / GTETRGA

表 8-4　端子インタフェース[3/3]

機能	RX26T Type A	RX26T Type C
インバータ母線電圧測定	P43 / AN003	P43 / AN003
回転速度指令値入力 (VR1)	P50 / AN204	P47 / AN206
START/STOP トグルスイッチ (SW1)	P23	P21
ERROR RESET プッシュスイッチ (SW2)	P22	P20
LED1 点灯/消灯制御	P21	P65
LED2 点灯/消灯制御	P20	PB5
U 相電流測定	P40 / AN000	P40 / AN000
V 相電流測定	P41 / AN001	P41 / AN001
W 相電流測定	P42 / AN002	P42 / AN002
PWM 出力(U_p)	P73 / GTIOC2A	P71 / GTIOC0A
PWM 出力(V_p)	P72 / GTIOC1A	P72 / GTIOC1A
PWM 出力(W_p)	P71 / GTIOC0A	P73 / GTIOC2A
PWM 出力(U_n)	P76 / GTIOC2B	P74 / GTIOC0B
PWM 出力(V_n)	P75 / GTIOC1B	P75 / GTIOC1B
PWM 出力(W_n)	P74 / GTIOC0B	P76 / GTIOC2B
過電流検出時の PWM 緊急停止入力	P70 / GTETRGB	P96 / GTETRGB

8.2 周辺機能

サンプルソフトウェアで使用する周辺機能一覧を表 8-5、表 8-6、表 8-7 に示します。

表 8-5 周辺機能対応表 [1/3]

周辺機能	用途	RA6T2	RA6T3	RA4T1
A/D コンバータ	U 相電流測定	AN004	AN000	AN000
	V 相電流測定	AN002	AN001	AN001
	W 相電流測定	AN000	AN002	AN002
	インバータ母線電圧測定	AN007	AN004	AN004
	VR 入力	AN016	AN005	AN005
AGTW	速度制御インターバルタイマ	AGT0	AGT0	AGT0
GPT	U 相 PWM 出力	CH4	CH1	CH1
	V 相 PWM 出力	CH5	CH2	CH2
	W 相 PWM 出力	CH6	CH3	CH3
POEG	過電流検出時の PWM 緊急停止入力	Group D	Group B	Group B

表 8-6 周辺機能対応表 [2/3]

周辺機能	用途	RA8T1	RA8T2
A/D コンバータ	U 相電流測定	AN000	AN006
	V 相電流測定	AN001	AN008
	W 相電流測定	AN002	AN010
	インバータ母線電圧測定	AN008	AN007
	VR 入力	AN007	AN015
AGTW	速度制御インターバルタイマ	AGT0	AGT0
GPT	U 相 PWM 出力	CH5	CH8
	V 相 PWM 出力	CH2	CH7
	W 相 PWM 出力	CH3	CH9
POEG	過電流検出時の PWM 緊急停止入力	Group A	Group A

表 8-7　周辺機能対応表 [3/3]

周辺機能	用途	RX26T Type A	RX26T Type C
A/D コンバータ	U 相電流測定	AN000	AN000
	V 相電流測定	AN001	AN001
	W 相電流測定	AN002	AN002
	インバータ母線電圧測定	AN003	AN003
	VR 入力	AN204	AN206
CMT	速度制御インターバルタイマ	CMT0	CMT0
GPT	U 相 PWM 出力	CH2	CH0
	V 相 PWM 出力	CH1	CH1
	W 相 PWM 出力	CH0	CH2
POEG	過電流検出時の PWM 緊急停止入力	Group B	Group B

(1). A/D コンバータ

U 相電流 (Iu)、V 相電流 (Iv)、W 相電流 (Iw)、およびインバータ母線電圧 (V_{dc})と回転速度指令値 (VR)を「シングルスキャンモード」で測定します(ハードウェアトリガを使用)。

A/D 変換は GPT のアンダーフロー (PWM の谷) と連動して動作させています。A/D 変換完了割り込みを、電流制御周期割り込みとして使用します。

(2). 非同期汎用タイマ（AGTW）

RA ファミリ MCU で速度制御周期割り込みのインターバルタイマとして使用します。

(3). コンペアマッチタイマ (CMT)

RX26T で速度制御割り込みのインターバルタイマとして使用します。

(4). 汎用 PWM タイマ（GPT）

相補 PWM 出力動作モードを使用して、デッドタイム付きの出力を行います。

(5). GPT 用ポートアウトプットイネーブル（POEG）

過電流検出時（GTETRGx 端子の Low レベル検出時）に PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にします。

9. ソフトウェア仕様・構成

9.1 ソフトウェア仕様

本システムのソフトウェアの基本仕様を下記に示します。

表 9-1 本ソフトウェア基本仕様

項 目	内 容	
モータ制御方式	位置センサレスベクトル制御	
モータ制御開始／停止	SW1 のレベルにより判定、または RMW からの入力	
回転子磁極位置検出	センサレス（電流引き込み制御 及び 誘起電圧オブザーバ）	
入力電圧	DC24V	
メインクロック周波数	RA6T2: 240 [MHz] RA6T3: 200 [MHz] RA4T1: 100 [MHz] RA8T1: 480 [MHz] RA8T2: 1 [GHz] RX26T: 120 [MHz]	
PWM キャリア周波数	20 [kHz] (キャリア周期 50 [μs])	
PWM 変調方式	空間ベクトル変調 （正弦波変調も選択可）	
デッドタイム	1.0 [μs]	
制御周期	電流制御周期	RA6T2: 50 [μs] RA6T3: 50 [μs] RA4T1: 100 [μs] RA8T1: 50 [μs] RA8T2 :50[μs] RX26T: 50 [μs]
	速度制御周期	RA6T2: 500 [μs] RA6T3: 500 [μs] RA4T1: 1000 [μs] RA8T1: 500 [μs] RA8T2: 500 [μs] RX26T: 500 [μs]
速度指令値管理	CW：0 [r/min] to 2400 [r/min] CCW：0 [r/min] to -2400 [r/min] ただし、600 [r/min]以下の場合は速度オープンループで駆動	
各制御系固有周波数	電流制御系：300 [Hz] 速度制御系：5 [Hz] 誘起電圧オブザーバ：1000 [Hz] 位置推定 PLL：20 [Hz]	
コンパイラ最適化設定	最適化レベル	Optimize more(-O2) (デフォルト設定)
保護停止処理	以下のいずれかの条件の時、モータ制御信号出力（6 本）を非アクティブにします。 1. 各相の電流ピーク値が 3.196(=1.13*sqrt (2)*2.0) [A]を超過（電流制御周期で監視） 2. インバータ母線電圧が 60 [V]を超過（電流制御周期で監視） 3. インバータ母線電圧が 8 [V]未満（電流制御周期で監視） 4. 回転速度が 4500 [r/min]を超過（電流制御周期で監視） 5. 過電流検出信号（POE/POEG）を検出時。外部からの過電流検出信号検出した場合、PWM 出力端子をハイインピーダンスにする。 6. 脱調検出機能有効時に脱調を検出したとき（電流制御周期で監視）	

9.2　ソフトウェア全体構造

ソフトウェアの全体構成を図 9-1 に示します。

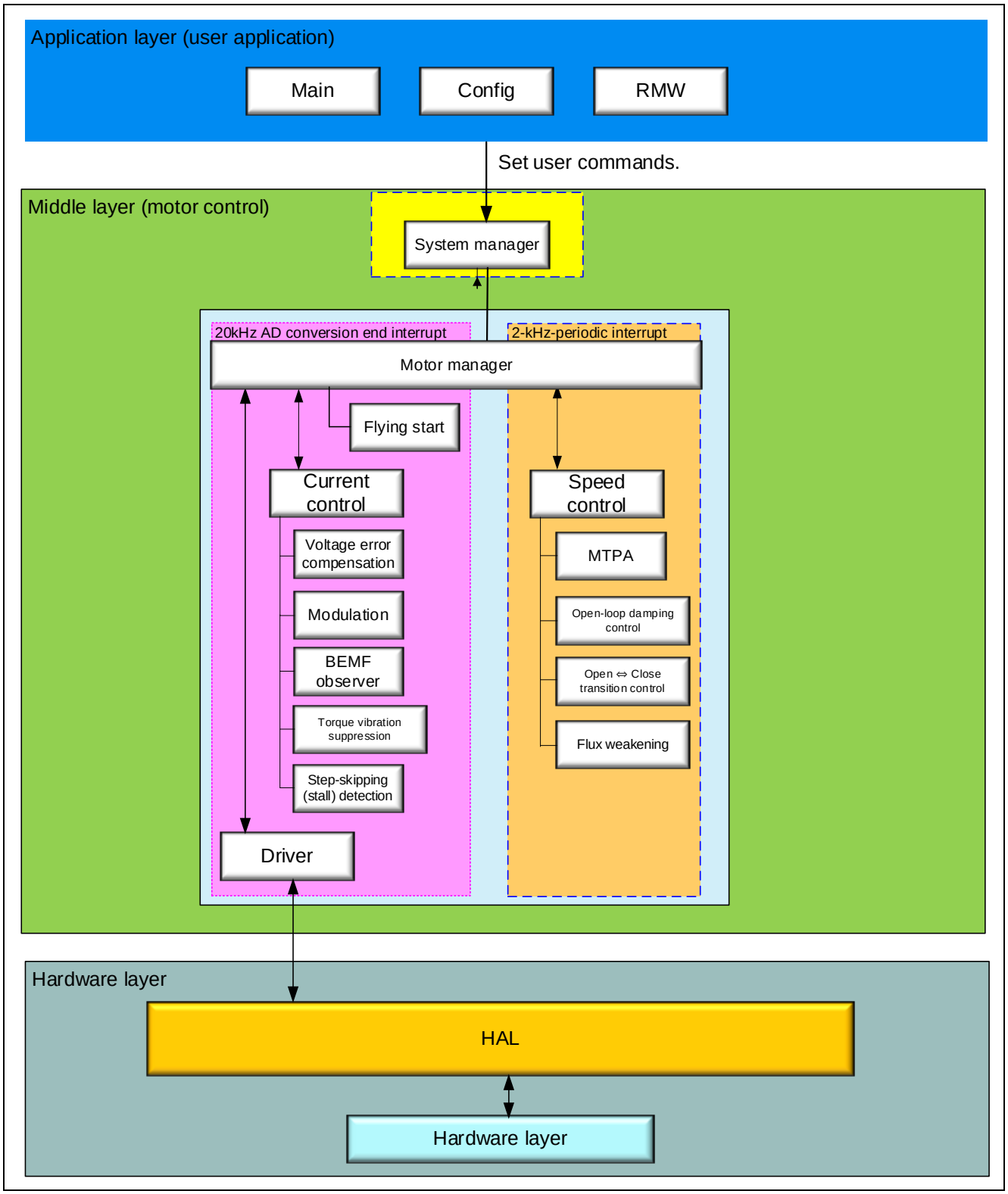


図 9-1　サンプルプログラムの全体構成

9.3 タスクの説明

モータ制御に関わるタスクは、0.5ms 周期の速度制御（RA4T1 は 1.0ms 周期）および 20kHz、50μs 周期の電流制御（RA4T1 は 10kHz, 100μs）です。

表 9-2 使用する割り込み・タスク（RA ファミリ MCU）

タスク	周辺機能	周期	割り込み関数	説明
モータ制御割り込み（速度制御）	agt0	500us (RA4T1: 1.0ms)	callback_agt_motor_speed_cyclic	
モータ制御割り込み（電流制御）（3 シャント電流検出時）	adc0	50us (RA4T1: 100 μs)	callback_gpt_adc_cyclic	
リセット時	-		※エラー復帰時に状態遷移処理の中で実行されます	
モータ出力過電流エラー割り込み	外部 IRQ		callback_poe_overcurrent	POEG のコールバック関数内では、必ず R_POEG_Reset()をコールしてフラグをリセットしてください。割り込み優先度によっては、その他の処理が停止する場合があります。
RMW 操作	-		r_app_rmw_ui_mainloop	

表 9-3 使用する割り込み・タスク（RX26T）

タスク	周辺機能	周期	割り込み関数	説明
モータ制御割り込み（速度制御）	CMT0	500 μs	r_Config_CMT0_cmi0_interrupt	
モータ制御割り込み（電流制御）（3 シャント電流検出時）	S12AD0	50 μs	r_Config_S12AD0_interrupt	
リセット時	—		※エラー復帰時に状態遷移処理の中で実行されます	
モータ出力過電流エラー割り込み	POEGB		r_Config_POEG_poeggbi_interrupt	
RMW 操作	—		r_app_rmw_ui_mainloop	

9.4　ファイル・フォルダ構成

RA ファミリ MCU 用サンプルプログラムのフォルダとファイル構成を表 9-4 に示します。

表 9-4　ファイル・フォルダ構成（RA ファミリ MCU）

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
ra		FSP ライブラリ,ミドルウェア本体	フォルダ内編集禁止
ra_cfg		FSP ライブラリ用設定ヘッダ	
ra_gen		HAL 関連,自動生成ファイル群	
script		FSP 用リンカスクリプトファイル	
src/application		hal_entry.c	起動ルーチンモジュール
src/application/main		mtr_interrupt.c/h	割り込み関数
		mtr_main.c/h	メインモジュール
src/application/mcu	ra6t2 / ra6t3 / ra4t1 / ra8t1 / ra8t2	r_app_mcu.c/h	HAL 依存メインモジュール
		r_app_mcu_callback.c	Callback 処理モジュール
		r_motor_driver_fsp.c	モータ関連 HAL ドライバ
		r_motor_driver_hal.h	モータ関連 HAL ドライバ定義
src/application/motor_module	sensorless_vector	r_motor_sensorless_vector_action.c	アクション関数定義
		r_motor_sensorless_vector_api.c/h	モータマネージャモジュールの API 関数定義
		r_motor_sensorless_vector_flyingstart.a/h	フライングスタートモジュール
		r_motor_sensorless_vector_manager.c/h	マネージャモジュールのローカル関数定義
		r_motor_sensorless_vector_protection.c/h	保護機能の関数定義
		r_motor_sensorless_vector_statemachine.c/h	状態遷移関連の関数定義
	current	r_motor_current_api.c/h	電流制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_current.c/h	電流制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_current_modulation.c/h	変調モジュールの関数定義
		r_motor_current_volt_err_comp.a/h	電圧誤差補償モジュールの関数定義
		r_motor_current_bemf_observer.a/h	誘起電圧オブザーバの関数定義
		r_motor_current_pi_gain_calc.c	電流制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
		r_motor_current_stall_detection.a/h	脱調検知モジュール
		r_motor_current_trq_vib_comp.a/h	トルク振動抑制モジュール
	speed	r_motor_speed_api.c/h	速度制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_speed.c/h	速度制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_speed_fluxwkn.a/h	弱め磁束制御モジュール
		r_motor_speed_mtpa.c/h	MTPA モジュール
		r_motor_speed_opl_damp_ctrl.a/h	ダンピング制御モジュール
		r_motor_speed_opl2less.a/h	センサレス制御切り替え処理関数定義
		r_motor_speed_pi_gain_calc.c	速度制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
	driver	r_motor_driver.c/h	ドライバモジュールの関数定義
	general	r_motor_filter.c/h	汎用フィルタ関数定義
		r_motor_pi_control.c/h	PI 制御関数定義
		r_motor_common.h	共通定義

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
	cfg	r_motor_inverter_cfg.h	インバータのコンフィグレーション定義
		r_motor_module_cfg.h	制御モジュールのコンフィグレーション定義
		r_motor_targetmotor_cfg.h	モータのコンフィグレーション定義
src/application/system_module	system_manager	r_system_manager.c/h r_system_manager_api.c/h	システムマネージャモジュール
src/application/user_interface	ics	r_mtr_ics.c/h	RMW の I/F 関数定義
		ICS2_RAYYY[2].o/h	RMW の通信用ライブラリ
		convert.bat	MAP ファイル生成バッチ
		ElfMapConverter.exe	MAP ファイル生成ツール
		ICS2_RAYYY[2]_Built_in.o	RMW ビルトイン用オブジェクト
		XXX[1].rmt	RMT ファイル
	board_ui	r_app_board_ui.c/h	MCU 依存のボード UI 関数定義

FSP を使用することで、周辺機能ドライバを GUI 画面上から簡単に生成することができます。

FSP は、プロジェクトで使用するマイクロコントローラ、周辺機能、端子機能などの設定情報をプロジェクト・ファイル（configuration.xml）に保存しています。本サンプルプログラムの周辺機能設定を確認する場合、e[2] studio 上の FSP 設定画面を参照してください。FSP で生成したフォルダとファイル構成を下記に示します。

【注】1’XXX’は、各プロジェクト毎に異なります。

2 ‘YYY’は RA MCU 毎に異なります。例えば、RA6T2 用通信用ライブラリファイルは ICS2_RA6T2.o/h.となります。

表 9-5　FSP で生成されるフォルダの説明

フォルダ名	フォルダの説明
ra	様々な FSP に関連するモジュール・ライブラリファイルを含みます。自動生成されるため、フォルダ内のファイル・フォルダ構成は変更しないでください。
ra_cfg	FSP ライブラリの設定関連ヘッダファイルを含みます。自動生成されるため、フォルダ内のファイル・フォルダ構成は変更しないでください。
ra_gen	FSP のライブラリと、ユーザーアプリケーションを仲介する HAL(ハードウェア抽象化レイヤー)のファイルを含みます。ユーザが FSP で使用するために設定した値がモジュールとして生成されます。常時自動生成されるため、フォルダ内のファイル・フォルダ構成は変更しないでください。
script	FSP モジュールをリンカに登録するためのスクリプトファイルを含みます。

RX26T 用サンプルプログラムのフォルダとファイル構成を表 9-6 に示します。

表 9-6　ファイル・フォルダ構成（RX26T）

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
smc_gen	Config_CMT0	Config_CMT0_user.c	制御周期用 CMT0 関連ユーザ関数定義
		Config_CMT0.c/h	制御周期用 CMT0 関連関数定義
	Config_GPT0	Config_GPT0_user.c	GPT0 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT0.c/h	GPT0 関連関数定義

	Config_GPT1	Config_GPT1_user.c	GPT1 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT1.c/h	GPT1 関連関数定義
	Config_GPT2	Config_GPT2_user.c	GPT2 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT2.c/h	GPT2 関連関数定義
	Config_IWDT	Config_IWDT_user.c	IWDT 関連ユーザ関数定義
		Config_IWDT.c/h	IWDT 関連関数定義
	Config_POEG	Config_POEG_user.c	POEG 関連ユーザ関数定義
		Config_POEG.c/h	POEG 関連関数定義
	Config_PORT	Config_PORT_user.c	PORT 関連ユーザ関数定義
		Config_PORT.c/h	PORT 関連関数定義
	Config_S12AD0	Config_S12AD0_user.c	S12AD0 関連ユーザ関数定義
		Config_S12AD0.c/h	S12AD0 関連関数定義
	Config_S12AD2	Config_S12AD2_user.c	S12AD2 関連ユーザ関数定義
		Config_S12AD2.c/h	S12AD2 関連関数定義
	general	共通	フォルダ内編集禁止
	r_bsp	ボードサポートパッケージ	
	r_config	コンフィグ	
	r_pincfg	ピン設定	
src/application		main.c	起動ルーチンモジュール
src/application/main		mtr_interrupt.c/h	割り込み関数
		mtr_main.c/h	メインモジュール
src/application/mcu	rx26t	r_app_mcu.c/h	HAL 依存処理メインモジュール
		r_motor_driver_smc.c	モータ関連 HAL ドライバ
		r_motor_driver_hal.h	モータ関連 HAL ドライバ定義
src/application/motor_module	sensorless_vector	r_motor_sensorless_vector_action.c	アクション関数定義
		r_motor_sensorless_vector_api.c/h	モータマネージャモジュールの API 関数定義
		r_motor_sensorless_vector_flyingstart.lib/h	フライングスタートモジュール
		r_motor_sensorless_vector_manager.c/h	マネージャモジュールのローカル関数定義
		r_motor_sensorless_vector_protection.c/h	保護機能の関数定義
		r_motor_sensorless_vector_statemachine.c/h	状態遷移関連の関数定義
	current	r_motor_current_api.c/h	電流制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_current.c/h	電流制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_current_modulation.c/h	変調モジュールの関数定義
		r_motor_current_volt_err_comp.lib/h	電圧誤差補償モジュールの関数定義
		r_motor_current_bemf_observer.lib/h	誘起電圧オブザーバの関数定義
		r_motor_current_pi_gain_calc.c	電流制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
		r_motor_current_stall_detection.lib/h	脱調検知モジュール
		r_motor_current_trq_vib_comp.lib/h	トルク振動抑制モジュール
	speed	r_motor_speed_api.c/h	速度制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_speed.c/h	速度制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_speed_fluxwkn.lib/h	弱め磁束制御モジュール
		r_motor_speed_mtpa.c/h	MTPA モジュール

		r_motor_speed_opl_damp_ctrl.lib/h	ダンピング制御モジュール
		r_motor_speed_opl2less.lib/h	センサレス制御切り替え処理関数定義
		r_motor_speed_pi_gain_calc.c	速度制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
	driver	r_motor_driver.c/h	ドライバモジュールの関数定義
	general	r_motor_filter.c/h	汎用フィルタ関数定義
		r_motor_pi_control.c/h	PI 制御関数定義
		r_motor_common.h	共通定義
	cfg	r_motor_inverter_cfg.h	インバータのコンフィグレーション定義
		r_motor_module_cfg.h	制御モジュールのコンフィグレーション定義
		r_motor_targetmotor_cfg.h	モータのコンフィグレーション定義
src/application/system_module	system_manager	r_system_manager.c/h r_system_manager_api.c/h	システムマネージャモジュール
src/application/user_interface	ics	r_mtr_ics.c/h	RMW の I/F 関数定義
		ICS2_RX26T.h	RMW の通信用ライブラリ
		XXX.rmt	RMT ファイル
		ICS2_RX26T.lib	RMW の通信用ライブラリ
	Board_ui	r_app_board_ui.c/h	ボード UI 関数定義

SC を使用することで、周辺機能ドライバを GUI 画面上から簡単に生成することができます。

SC は、プロジェクトで使用するマイクロコントローラ、周辺機能、端子機能などの設定情報をプロジェクト・ファイル（RX26T_XXX.scfg）に保存しています。本サンプルプログラムの周辺機能設定を確認する場合、e² studio 上の SC 設定画面を参照してください。なお、'XXX'は、各プロジェクト毎に異なることにご注意ください。

9.5　アプリケーション層

アプリケーション層はシステムマネージャとユーザインタフェースとなる RMW の管理処理、システムマネージャに対する制御の指令値設定や制御モジュールのパラメータ更新を行っています。サンプルプログラムでは、RMW を使用 (RMW UI) して、設定及び処理を行います。また、この UI からモータの駆動/停止や、制御の指令値設定などを行っています。

9.5.1　機能

アプリケーション層で行われる機能一覧を表 9-7 に示します。

表 9-7　アプリケーション層の機能一覧

機能	説明
メイン処理	ユーザの指令に対してシステムを有効 / 無効に設定します。
UI 処理	ボード UI／RMW UI の選択と管理を行います。
RMW の UI 処理	RMW の管理、指令値含むパラメータの取得・設定を行います。
MCU の初期設定	FSP/SC を用いて MCU の初期設定を行います。キャリブレーションやアプリケーションに合わせた設定も併せて行います。
FSP/SC との仲介処理	FSP/SC に設定された、周辺機能に割り付けられたコールバック関数の定義と、システムマネージャを通じて下位のモジュールに受け渡す処理を行います。

9.5.2　構造体・変数情報

アプリケーション層でユーザが使用可能な変数一覧は、システムマネージャにて定義・管理されていますが、サンプルソフトウェアの利用の便宜上、RMW の章の表 6-4 に示します。また、RMW を使用してモータモジュールのパラメータを更新するための構造体を用意しており、その構造体メンバを表 9-8 に示します。

変数は、RMW から値を設定することで、本アプリケーション層が表 9-8 に示す構造体を介して、各制御モジュールの変数に、変更した値が各モジュールの Update 関数を介して反映されます。

表 9-8　RMW によるパラメータ更新用構造体の変数一覧

構造体	変数	説明
st_rmw_param_buffer_t RMW 変数更新用構造体	u2_offset_calc_time	電流オフセットの検出時間[s]
	u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間 [cnt]
	st_motor	モータパラメータ用の構造体
	f4_max_speed_rpm	最大速度 [r/min] (機械角)
	u1_ctrl_loop_mode	制御ループのモード (速度制御)
	f4_ol_ref_id	オープンループ制御時 Id 電流指令値 [A]
	f4_id_up_time	Id 上昇時間 [cnt]
	f4_id_down_time	Id 下降時間 [cnt]
	f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
	f4_id_up_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]

構造体	変数	説明
	f4_current_omega_hz	電流制御系固有周波数 [Hz]
	f4_current_zeta	電流制御系減衰係数
	f4_speed_omega_hz	速度制御系固有周波数 [Hz]
	f4_speed_zeta	速度制御系減衰係数
	f4_speed_lpf_hz	速度 LPF カットオフ周波数[Hz]
	f4_ref_speed_rpm	速度指令値 [r/min] (機械角)
	f4_speed_rate_limit_rpm	速度の変化量制限 [r/min/s] (機械角)
	f4_overspeed_limit_rpm	速度制限値 [r/min] (機械角)
	u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償の有効/無効
	u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の有効/無効
	u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の有効/無効
	u1_flag_flying_start_use	フライングスタートの有効/無効
	u1_flag_stall_detection_use	脱調検出の有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制の有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_mode	トルク振動抑制・補償信号生成方式
	f4_e_obs_omega_hz	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
	f4_e_obs_zeta	誘起電圧推定系減衰係数
	f4_pll_est_omega_hz	位置推定系固有周波数 [Hz]
	f4_pll_est_zeta	位置推定系減衰係数
	u1_flag_less_switch_use	センサレス切り替えのソフトスイッチングの有効/無効
	f4_switch_phase_err_deg	センサレス切り替え角度誤差[deg]
	f4_opl2less_sw_time	センサレス切り替え時間[s]
	f4_phase_err_lpf_cut_freq	角度誤差 LPF 周波数[Hz]
	u1_flag_openloop_damping_use	ダンピング機能の有効/無効
	f4_ed_hpf_omega	ダンピング制御・HPF 固有周波数[Hz]
	f4_ol_damping_zeta	ダンピング制御・減衰係数
	f4_ol_damping_fb_limit_rate	ダンピング制御・フィードバック制限率
	f4_id_hpf_time	脱調検知・Id 振動検出用 HPF 定数
	f4_iq_hpf_time	脱調検知・Iq 振動検出用 HPF 定数
	f4_threshold_level	脱調検知・閾値[A]
	f4_threshold_time	脱調検知・監視時間[s]
	u1_target_2f	トルク振動抑制・抑制対象の 2 次成分の抑制 有効/無効
	f4_timelead_1f	トルク振動抑制・位相調整値（1 次成分）

構造体	変数	説明
	f4_timelead_2f	トルク振動抑制・位相調整値（2 次成分）
	f4_tf_lpf_omega	トルク振動抑制・LPF カットオフ周波数
	f4_output_gain_1f	トルク振動抑制・TF 出力ゲイン（1 次成分）
	f4_output_gain_2f	トルク振動抑制・TF 出力ゲイン（2 次成分）
	f4_input_weight2	トルク振動抑制・重みづけ 2
	f4_input_weight1	トルク振動抑制・重みづけ 1
	f4_input_weight0	トルク振動抑制・重みづけ 0
	f4_suppression_th_1f	トルク振動抑制・抑制目標（1 次成分）
	f4_suppression_th_2f	トルク振動抑制・抑制目標（2 次成分）
	f4_abnormal_output_th_1f	トルク振動抑制・TF 出力異常度（1 次成分）
	f4_abnormal_output_th_2f	トルク振動抑制・TF 出力異常度（2 次成分）
	f4_restart_speed	フライングスタート・再始動速度 [r/min](機械角)
	f4_off_time	フライングスタート・短絡 OFF 時間[s]
	f4_over_time	フライングスタート・短絡検出監視時間 [s]
	f4_active_brake_time	フライングスタート・アクティブブレーキ時間[s]
	f4_on_current_th	フライングスタート・短絡電流閾値[A]

9.5.3　マクロ定義

RMW のマクロ一覧を表 9-9 に示します。

表 9-9　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_app_mcu.h	ICS_DECIMATION	RA4T1 : 3 RA6T2, RA6T3, RA8T1, RA8T2, RX26T : 5	RMW watchpoint のスキップ回数
	ICS_BRR	RA4T1, RA6T3 : 250 RA6T2, RA8T1, RA8T2, RX26T : 19	RMW の通信ボーレート
	ICS_INT_MODE	RA4T1, RA6T2, RA8T1, RA8T2, RX26T : 1 RA6T3 : 3	RMW の通信モード選択

【注】　RMW で通信を行うためのチャネルを定義したマクロが ICS2_RAyyy2.h, ICS2_RX26T.h に用意されています。(yyy は MCU の名称)

9.5.4　パラメータ調整・設定

アプリケーション層で設定できるパラメータは、RMW で使用する com 変数のみです。システムマネージャやモータマネージャで使用するパラメータは、それぞれの章を参照してください。

運転中の変数の設定・更新は、RMW から行ってください。RMW の操作は 6.8 及び Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル（r21uz0004）を参照ください。

9.6　システムマネージャ

システムマネージャ(r_system_manager)は、アプリケーション層から与えられる指令値やパラメータ設定、コールバック通知を元に、モータマネージャの指令値設定や制御モジュールのパラメータ更新を行っています。

9.6.1　機能

システムマネージャで設定している機能一覧を以下に示します。

表 9-10　システムマネージャの機能一覧

機能	説明
システムマネージャ処理	アプリケーション層から与えられる指令値、パラメータの処理ならびにコールバック関数の受け渡しを行います。また、モータマネージャと検出値や状態の受け渡し処理も行います。
モータマネージャ処理	速度制御の指令値の取得・設定を行います。

9.6.2　モジュール構成図

モジュール構成図を以下に示します。

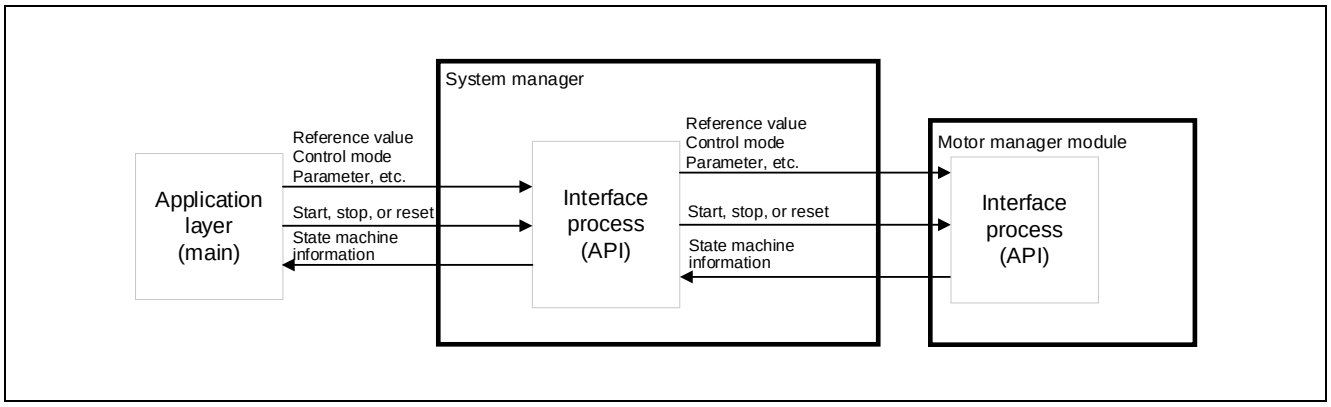


図 9-2　システムマネージャのモジュール構成図

9.7　モータマネージャ

モータマネージャ(r_motor_sensorless_vector_manager)は、モータ制御モジュールに含まれる各制御モジュールを適切に使用してモータ制御を行うモジュールです。各モジュールのインタフェースやモータ制御のシステム全体の管理、システム保護などを行っています。

9.7.1　機能

モータマネージャの機能一覧を表 9-11 に示します。モータ制御モジュールの機能の一覧を表 9-12 及び表 9-13 に示します。

表 9-11　モータマネージャモジュールの機能一覧

機能	説明
モード管理	ユーザの指令に対してシステムを切り替えてモータを制御します。
保護機能	システム保護機能によりエラー処理を行います。
制御方式の管理	速度制御や電流制御の状態の取得・設定を行います。
速度・位置情報の取得	速度制御・電流制御モジュールから、速度・位置情報の取得を行います。
制御モジュールの指令値設定	電流制御・速度制御モジュールに対して入力する指令値を制御の状態から選択します。
フライングスタート	モータが回転中であっても、始動する機能です。
割り込み処理	FSP/SC で設定したコールバック関数（割り込み）を受けて処理を行い、適切なモジュールへ処理の割り振りを行います。

表 9-12　速度制御モジュールの機能一覧

機能	説明
速度制御	速度指令値に追従するよう演算を行い、電流指令値を出力します。
速度指令設定	速度モジュールに速度指令値を設定します。
弱め磁束制御	d 軸電流を制御し、定格回転速度以上でも運転できるように制御します。
最大トルク/電流制御	d 軸電流を制御し、負荷状況に応じて最大のトルクが出力されるようにします。

表 9-13　電流制御モジュールの機能一覧

機能	説明
電流制御	電流指令値に追従するよう演算を行い、PWM 出力値を設定します。
電流オフセット調整	AD で検出した電流値のオフセット値を計算します。
電圧誤差補償	出力電圧のデッドタイムによる影響を補償します。
順変換、逆変換	ベクトル制御を行うために検出した電流値に対して、座標変換を行います。演算結果に対して座標の逆変換を行い元の座標軸に戻します。
PWM 変調	PWM 信号に変調してモータに任意の周波数・電圧を印加します。
非干渉制御	dq 軸の干渉を防ぐために干渉を打ち消す演算を行います。
サンプルディレイ補償	3 相電圧指令値を生成する際に電流制御サイクル分のサンプル遅延を補償します。
トルク振動抑制	機械角 1 周期の負荷振動を検知して、抑制する制御を行います。
脱調検知	モータの磁極位置と制御系の磁極がずれたことを検知し、停止させます。
誘起電圧オブザーバ	中高速運転時に誘起電圧オブザーバを使って、位置・速度を推定します。

9.7.2　モジュール構成図

モジュール構成図を図 9-3 に示します。

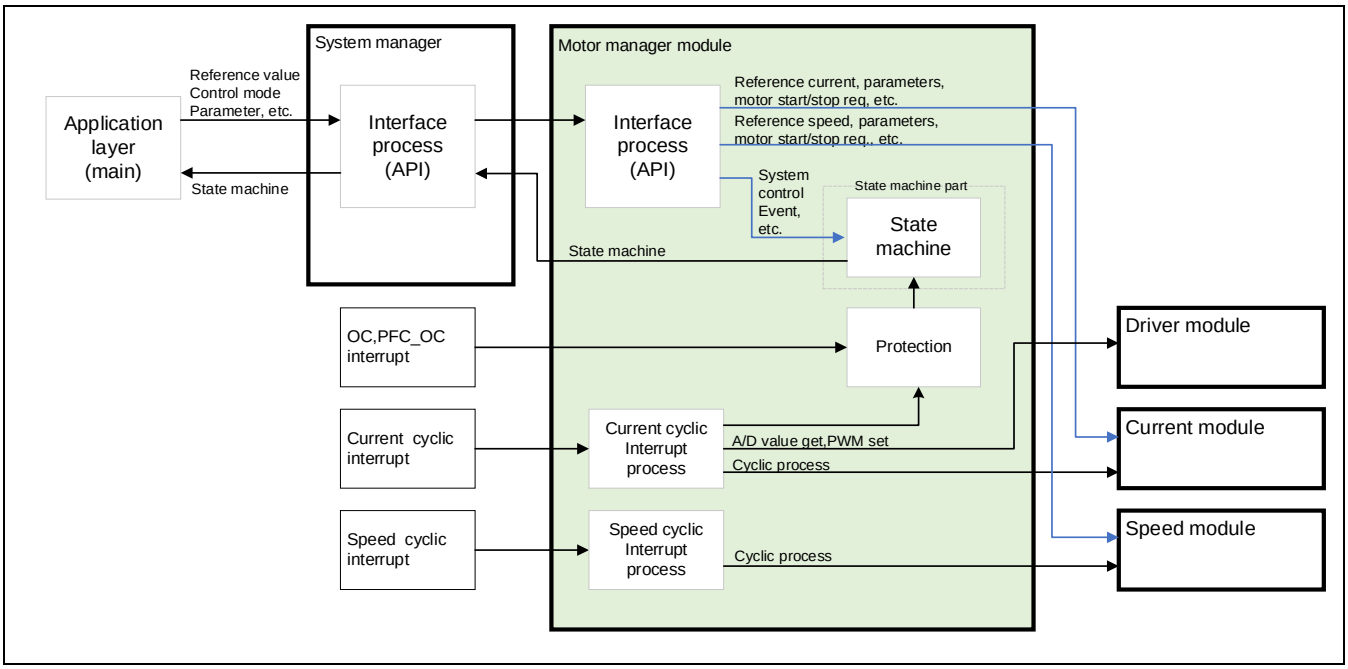


図 9-3　マネージャモジュール構成図

9.7.3　モード管理

図 9-4 に本サンプルプログラムにおける状態遷移図を示します。本サンプルプログラムでは、「SYSTEM MODE」と、「RUN MODE」により状態を管理し、「Control Config」は、ソフトウェア内でアクティブになっている制御系を表しています。

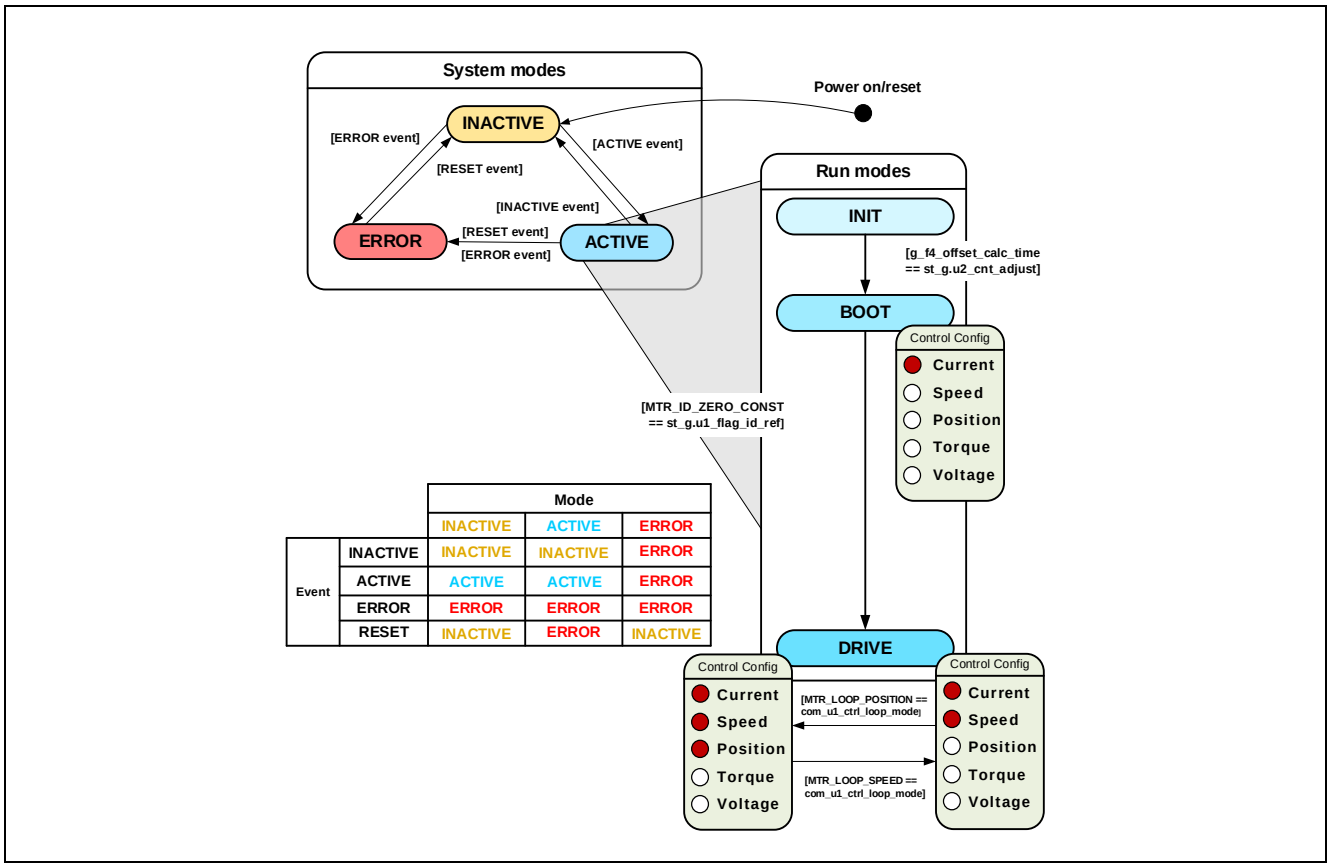


図 9-4　モータ制御ソフトウェアの状態遷移図

(1)　SYSTEM MODE

システム動作状態を表します。各イベント（EVENT）の発生により、状態が遷移します。システムの動作状態は、モータ駆動停止（INACTIVE）、モータ駆動（ACTIVE）、異常状態（ERROR）があります。

(2)　RUN MODE

モータの制御状態を表します。システムの状態が ACTIVE になると、モータの駆動状態が図 9-4 のように遷移します。

(3)　EVENT

各 SYSTEM MODE 中に EVENT が発生すると、その EVENT に従って、システム動作状態が図 9-4 中の表のように遷移します。各 EVENT の発生要因は下記となります。

表 9-14　EVENT 一覧

イベント名	発生要因
INACTIVE	ユーザ操作により発生します
ACTIVE	ユーザ操作により発生します
ERROR	システムが異常を検出したときに発生します
RESET	ユーザ操作により発生します

9.7.4　シーケンスの説明

本サンプルプログラムでは、モードと呼ばれる運転・停止・エラーを管理する状態遷移に加えて、２種類の方式を速度に応じて切り替えるセンサレス制御を行います。そのための運転状態を管理するシーケンスの２つを有しています。モードは、9.7.3 を参照してください。ここでは、後者の運転状態を管理するシーケンスを説明します。以下に示します。

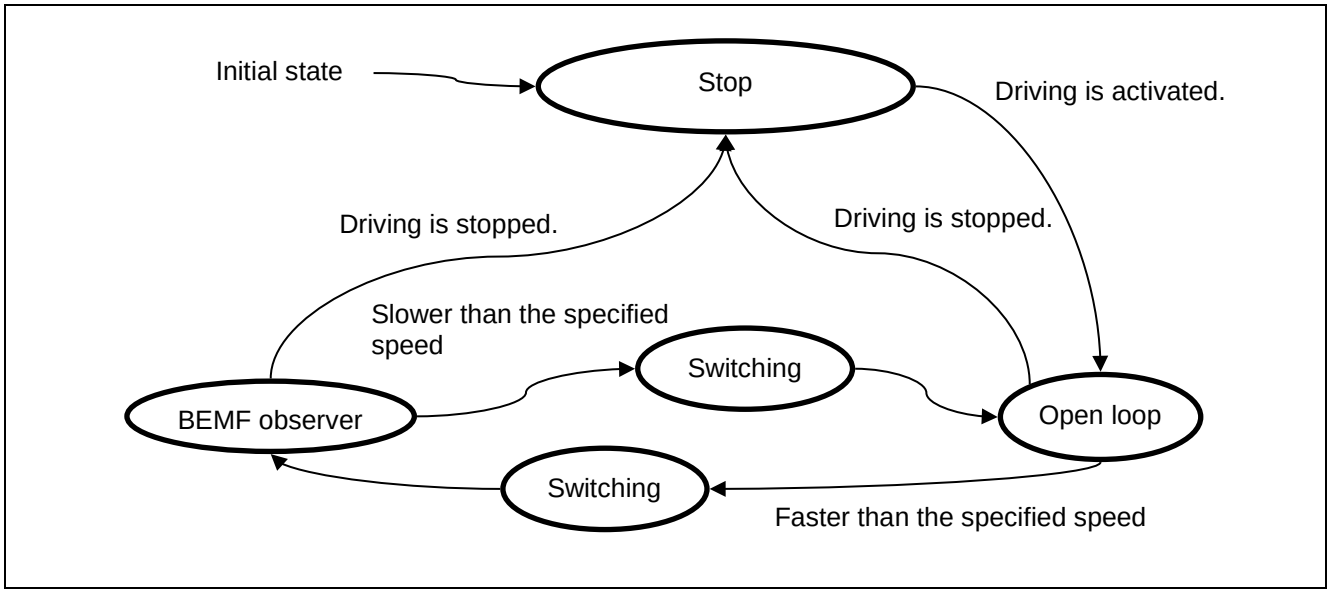


図 9-5　運転シーケンスの状態遷移図

表 9-15　運転シーケンスの状態とその説明

状態	状態の説明
初期状態	CPU が初期化される前の状態です。
停止	CPU ボードの電源が ON して、起動した状態です。モータは停止状態です。
オープンループ	0r/min(モータに電流が流れている状態であるが停止)から 600r/min 程度(変更可能)までの間でモータを運転している状態です。OpenLoop 制御アルゴリズムを用いてモータ制御を行います。
切り替え	低速運転で使用している OpenLoop 制御から、中高速運転で使用するセンサレスアルゴリズムに切り替えを行う状態です。 加速時は、中高速運転のアルゴリズムにデータの引継ぎを行います。データの引継ぎが完了次第、自動的に中高速運転状態に切り替わります。 減速時は、OpenLoop 制御にデータの引継ぎを行っている状態です。データの引継ぎが完了次第、自動的に低速運転状態に切り替わります。
BEMF オブザーバ	センサレスベクトル制御で運転するように設定された速度から、モータの定格速度までの範囲でモータを運転している状態です。誘起電圧オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御を行います。

9.7.5　始動シーケンス

　マネージャモジュールでは RUN MODE のステータスに合わせて、速度指令値を管理するフラグを変更してモータを制御しています。また、これらの指令値を適切に変更することで始動シーケンスを作成し、モータの始動を行います。始動シーケンスの動きを図 9-6 に示します。

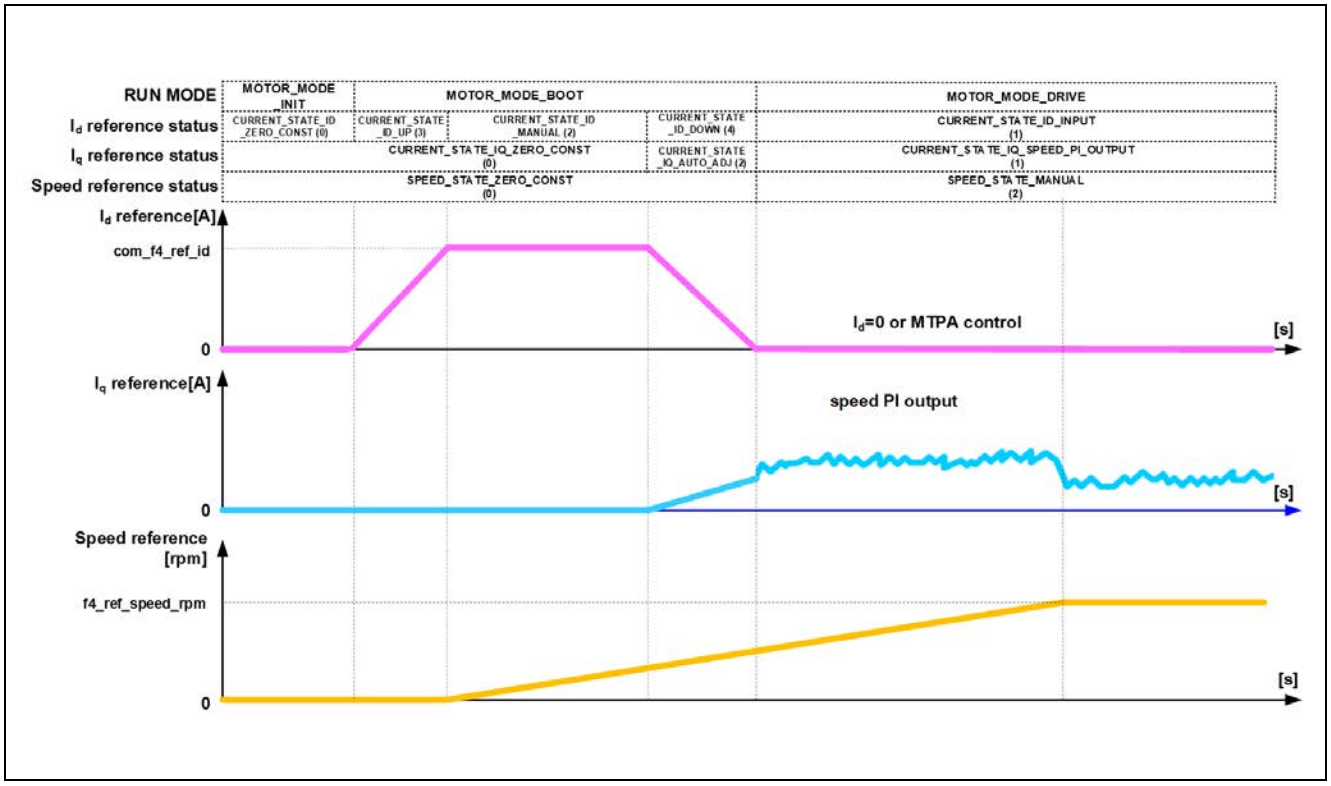


図 9-6　始動シーケンスの内容

9.7.6　保護機能

本制御プログラムは、以下のエラー状態を持ち、それぞれの場合に緊急停止機能を実装しています。システム保護機能に関わる各設定値は表 9-16 を参照してください。

- 過電流エラー
  過電流エラーはハードウェア及びソフトウェア両方で検出されます。
  ハードウェアからの緊急停止信号（過電流検出）により、PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にします。また、過電流監視周期で U 相、V 相、W 相電流を監視し、過電流（過電流リミット値を超過）を検出した時に、緊急停止します（ソフトウェア検出）。
  過電流リミット値はモータの定格電流 (MOTOR_CFG_NOMINAL_CURRENT_RMS)から自動で計算されます。

- 過電圧エラー
  過電圧監視周期でインバータ母線電圧を監視し、過電圧（過電圧リミット値を超過）を検出した時に、緊急停止します。過電圧リミット値は検出回路の抵抗値の誤差等を考慮して設定した値です。

- 低電圧エラー
  低電圧監視周期でインバータ母線電圧を監視し、低電圧（低電圧リミット値を下回った場合）を検出した時に、緊急停止します。低電圧リミット値は検出回路の抵抗値の誤差等を考慮して設定した値です。

- 回転速度エラー
  回転速度監視周期で速度を監視し、速度リミット値を超過した場合、緊急停止します。

- 脱調検知エラー
  センサレスベクトル制御で運転中に脱調の兆候が見られた場合、緊急停止します。本機能を使用する場合、脱調検知機能を有効にする必要があります。

表 9-16　各システム保護機能の動作条件・設定値

過電流エラー	過電流リミット値 [A]	3.196
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
過電圧エラー	過電圧リミット値 [V]	60
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
低電圧エラー	低電圧リミット値 [V]	8
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
回転速度エラー	速度リミット値 [r/min]	4500
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
脱調検知エラー	発生条件	脱調を検知した場合
	監視周期 [us]	電流制御周期*1

【注】　1. 表 9-1　本ソフトウェア基本仕様参照

9.7.7 API

マネージャモジュールの API 一覧を表 9-17 に示します。

表 9-17 API 一覧

API	説明
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_Open	本モジュールと使用するモジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_Close	本モジュールをリセット状態にします。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_Reset	モジュールの初期化を行います。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ParameterUpdate	本モジュールの制御パラメータを更新します。また、関連するモジュールの制御パラメータ更新を行います。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_MotorStart	モータ駆動状態にします。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_MotorStop	モータ停止状態にします。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_MotorReset	システムのエラー状態を解除します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ErrorSet	システムにエラー状態を設定します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_SpeedSet	速度指令値を設定します。速度制御時に有効になります。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_SpeedGet	速度情報を取得します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_StatusGet	ステートマシンの状態を取得します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ErrorStatusGet	エラー状態を取得します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_CtrlTypeSet	制御方式を設定します。制御方式を変更する場合は、モータを停止状態にしてください。 0：位置制御(Not use) 1：速度制御
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_LoopModeStatusGet	制御方式を取得します。 0：位置制御(Not use) 1：速度制御
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_SpeedInterrupt	速度制御を行うための割り込み処理を行います。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_CurrentInterrupt	電流制御を行うための割り込み処理を行います。（3 シャント電流検出用）
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_OverCurrentInterrupt	過電流が発生した際の割り込み処理を行います。

表 9-18　電流制御モジュールの API 一覧

API	説明
R_MOTOR_CURRENT_Open	電流制御モジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_CURRENT_Close	電流制御モジュールをリセット状態にします。
R_MOTOR_CURRENT_Reset	電流制御モジュールの初期化をします。
R_MOTOR_CURRENT_Run	電流制御モジュールをアクティブ状態にします。
R_MOTOR_CURRENT_ParameterSet	電流制御に使用する変数情報を入力します。
R_MOTOR_CURRENT_ParameterGet	電流制御結果の出力を取得します。
R_MOTOR_CURRENT_ParameterUpdate	電流制御モジュールの制御パラメータを更新します。
R_MOTOR_CURRENT_CurrentCyclic	電流制御を行います。
R_MOTOR_CURRENT_OffsetCalibration	電流検出のオフセット調整を行います。
R_MOTOR_CURRENT_CurrentOffsetRemove	電流検出オフセット値を除いた値を返します。
R_MOTOR_CURRENT_VoltErrCompParamSet	電圧誤差補償パラメータ設定を行います。
R_MOTOR_CURRENT_BEMFObserverParameterUpdate	誘起電圧オブザーバの制御パラメータを更新します
R_MOTOR_CURRENT_HuntingSupress	センサレス切り替え時の振動低減のために、 位置・速度推定用の PLL 積分項の初期値を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_PLLSpeedSet	位置・速度推定用の PLL 積分項の初期値を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_RotorAngleSet	磁極位置を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_RefstateSet	電流制御のステータスを設定します。
R_MOTOR_CURRENT_BEMFObserverParameterSet	誘起電圧オブザーバの q 軸電圧外乱を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_ChargeBootstrap	ブートストラップ回路への充電のための処理を行います。

表 9-19　速度制御モジュールの API 一覧

API	説明
R_MOTOR_SPEED_Open	速度モジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_SPEED_Close	モジュールをリセット状態にします。
R_MOTOR_SPEED_Reset	モジュールの初期化します。
R_MOTOR_SPEED_Run	モジュールをアクティブ状態にします。
R_MOTOR_SPEED_ParameterSet	速度制御に使用する変数情報を入力します。
R_MOTOR_SPEED_ParameterGet	速度制御結果の出力を取得します。
R_MOTOR_SPEED_ParameterUpdate	モジュールの制御パラメータを更新します。
R_MOTOR_SPEED_SpdRefSet	速度指令値を設定します。
R_MOTOR_SPEED_SpeedCyclic	速度制御を行います。
R_MOTOR_SPEED_Opl2lessReferenceIqCalc	センサレス制御切り替え時の q 軸電流指令値を計算します。
R_MOTOR_SPEED_Opl2lessPreprocess	センサレス制御切り替え時の前処理を行います。
R_MOTOR_SPEED_OplDampCtrl	オープンループダンピング制御を行います。
R_MOTOR_SPEED_OplDampReset	オープンループダンピング制御で使用する変数情報をリセットします。
R_MOTOR_SPEED_HuntingSuppress	速度 PI 制御の積分項の初期値を設定します。
R_MOTOR_SPEED_SwitchingFlagSet	センサレス制御切り替えフラグをセットします。
R_MOTOR_SPEED_ControlParamSet	速度制御で使用する速度の値を設定します。
R_MOTOR_SPEED_RefstateSet	速度制御で使用する電流制御ステータスを設定します。

9.7.8　構造体・変数情報

マネージャモジュールの構造体・変数一覧を表 9-20 に示します。マネージャモジュールは API のインスタンス確保にて、マネージャモジュール用構造体(g_st_sensorless_vector)を定義します。電流制御モジュールで使用する構造体・変数一覧を表 9-21 に、速度制御モジュールの構造体・変数一覧を表 9-22 に示します。電流制御モジュールと、速度制御モジュールは API のインスタンス確保にて、電流制御モジュール用構造体(g_st_cc)と、速度モジュール用構造体(g_st_sc)を定義します。

表 9-20　マネージャモジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_sensorless_vector_control_t マネージャモジュール用構造体	u1_flag_flying_start_use	フライングスタート機能 有効/無効
	u1_flag_less_switch_use	センサレス制御へのソフトスイッチング機能 有効/無効
	u1_flag_openloop_damping_use	オープンループダンピング制御 有効/無効
	u1_flag_down_to_ol	オープンループ制御への切り替えフラグ
	u1_flag_stop_transition	STOP ステートへの遷移中フラグ
	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	u1_state_speed_ref	速度指令値のステータス
	u1_direction	回転方向
	u1_ctrl_loop_mode	制御モード選択（速度・位置）
	u2_error_status	エラーステータス
	u2_run_mode	動作モード
	f4_vdc_ad	母線電圧 [V]
	f4_iu_ad	u 相電流 [A]
	f4_iv_ad	v 相電流 [A]
	f4_iw_ad	w 相電流 [A]
	f4_ibus_a_ad	A 点におけるインバータ母線電流（1shunt のみ）
	f4_ibus_b_ad	B 点におけるインバータ母線電流（1shunt のみ）
	f4_overcurrent_limit	過電流制限値 [A]
	f4_overvoltage_limit	過電圧制限値 [V]
	f4_undervoltage_limit	低電圧制限値 [V]
	f4_overspeed_limit_rad	過速度制限値 [rad/s]
	f4_phase_err_rad_lpf	角度誤差に対する LPF の出力 [rad]
	f4_switch_phase_err_rad	センサレス切り替え判断の角度誤差の閾値 [rad]
	f4_id_down_speed_rad	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
	f4_id_up_speed_rad	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]
	f4_id_damp_comp_speed	オープンループダンピング補償速度 [rad/s]

構造体	変数	説明
	f4_ol_speed_rad	オープンループ制御時の速度 [rad\s]
	st_phase_err_lpf	角度誤差用の LPF 構造体
	st_current_output	電流モジュールの出力用構造体
	st_speed_output	速度モジュールの出力用構造体
	st_stm	ステートマシンの構造体
	st_motor	モータパラメータ構造体
	st_flystart	フライングスタート構造体
	*p_st_driver	ドライバモジュールの構造体
	*p_st_cc	電流モジュールの構造体
	*p_st_sc	速度モジュールの構造体
st_sensorless_vector_cfg_t マネージャモジュール制御パラメータ設定用構造体	u1_flag_flying_start_use	フライングスタート機能有効/無効
	u1_flag_less_switch_use	ソフトなセンサレス切り替え機能の有効/無効
	u1_flag_openloop_damping_use	ダンピング機能の有効/無効
	u2_off_time_cnt	フライングスタート・短絡 OFF 時間 [cnt]
	f4_overspeed_limit_rpm	速度制限値 [r/min] (機械角)
	f4_switch_phase_err_deg	センサレス切り替え角度誤差[deg]
	f4_phase_err_lpf_cut_freq	位相誤差 LPF 周波数[Hz]
	f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
	f4_id_up_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]
	f4_ctrl_period	電流制御周期 [s]
	f4_restart_speed	フライングスタート・再始動速度 [r/min](機械角)
	f4_off_time	フライングスタート・短絡 OFF 時間 [s]
	f4_over_time	フライングスタート・短絡検出監視時間 [s]
	f4_active_brake_time	フライングスタート・アクティブブレーキ時間 [s]
	f4_on_current_th	フライングスタート・短絡電流閾値 [A]
	st_motor	モータパラメータ構造体

表 9-21　電流制御モジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_current_control_t 電流制御モジュール用構造体	u1_active	電流制御モジュールのアクティブ状態
	u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償機能 有効/無効
	u1_flag_stall_detection_use	脱調検出 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制制御 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_mode	トルク振動抑制・補償信号生成方式
	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	u1_flag_offset_calc	電流オフセット計算のフラグ
	u1_flag_charge_bootstrap	ブートストラップ回路への充電終了フラグ
	u2_offset_calc_time	電流オフセット調整時の測定時間設定
	u2_crnt_offset_cnt	電流オフセット調整時の測定回数
	u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間 [cnt]
	u2_charge_bootstrap_cnt	ブートストラップ回路への充電カウント [cnt]
	f4_ctrl_period	電流制御周期(期間)[s]
	f4_refu	u 相指令電圧[V]
	f4_refv	v 相指令電圧[V]
	f4_refw	w 相指令電圧[V]
	f4_vd_ref	d 軸電圧指令値[V]
	f4_vq_ref	q 軸電圧指令値[V]
	f4_id_ref	d 軸電流指令値[A]
	f4_iq_ref	q 軸電流指令値[A]
	f4_id_ad	d 軸電流値[A]
	f4_iq_ad	q 軸電流値[A]
	f4_lim_iq	q 軸電流制限値[A]
	f4_offset_iu	u 相オフセット電流値[A]
	f4_offset_iw	w 相オフセット電流値[A]
	f4_sum_iu_ad	u 相電流合計値[A]
	f4_sum_iw_ad	w 相電流合計値[A]
	f4_vdc_ad	母線電圧値[V]
	f4_iu_ad	u 相電流値[A]
	f4_iv_ad	v 相電流値[A]
	f4_iw_ad	w 相電流値[A]

構造体	変数	説明
	f4_modu	u 相デューティ比
	f4_modv	v 相デューティ比
	f4_modw	w 相デューティ比
	f4_speed_rad	速度[rad/s]
	f4_ref_id_ctrl	d 軸電流指令値 [A]
	f4_ref_iq_ctrl	q 軸電流指令値[A]
	f4_id_up_step	d 軸電流指令値の増加幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_id_down_step	d 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_iq_down_step	q 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_iq_down_step_inv	q 軸電流指令値の減少時間 [cnt] の逆数
	f4_ol_ref_id	オープンループ電流 [A]
	f4_va_max	dq 軸上の最大電圧 [V]
	f4_ed	d 軸誘起電圧推定値 [V]
	f4_eq	q 軸誘起電圧推定値 [V]
	f4_phase_err_rad	角度誤差 [rad]
	f4_ol_speed_rad	オープンループ時の掃引角度 [rad]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	速度指令値（LPF 後） [rad/s]
	st_mod	変調モジュールの構造体
	st_volt_comp	電圧誤差補償モジュールの構造体
	st_bemf_observer	誘起電圧オブザーバ構造体
	st_pll_est	位置・速度推定構造体（誘起電圧オブザーバ）
	st_pi_id	d 軸の pi 制御用構造体
	st_pi_iq	q 軸の pi 制御用構造体
	st_rotor_angle	ロータ情報の構造体
	st_rotor_angle_phasecomp	ロータ情報の構造体(進み補償)
	st_motor	モータパラメータの構造体
	st_stalldet	脱調検出構造体
	st_trqvib_comp	トルク振動抑制制御構造体
st_current_cfg_t 電流制御モジュール制御パラメータ設定用構造体	u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償 有効/無効
	u1_flag_stall_detection_use	脱調検出 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制制御 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_mode	トルク振動抑制・補償信号生成方式

構造体	変数	説明
	u1_target_2f	トルク振動抑制・抑制対象の 2 次成分の抑制有効/無効
	u2_offset_calc_time	オフセット計算時間設定 [cnt]
	u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間 [cnt]
	f4_ctrl_period	制御周期[s]
	f4_current_omega_hz	電流制御系固有周波数[Hz]
	f4_current_zeta	電流制御系減衰係数
	f4_id_up_step	d 軸電流指令値の増加幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_id_down_step	d 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_iq_down_step_time_inv	q 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_ol_ref_id	オープンループ電流 [A]
	f4_id_hpf_time	脱調検知・d 軸電流 HPF 時定数[s]
	f4_iq_hpf_time	脱調検知・q 軸電流 HPF 時定数[s]
	f4_threshold_level	脱調検知・検知レベル[A]
	f4_threshold_time	脱調検知・検知時間[s]
	f4_timelead_1f	トルク振動抑制・位相進み [rad] (1 次)
	f4_timelead_2f	トルク振動抑制・位相進み [rad] (2 次)
	f4_tf_lpf_omega	トルク振動抑制・TF 内部の LPF の固有周波数 [Hz]
	f4_output_gain_1f	トルク振動抑制・繰り返し制御器への入力値に対するゲイン(1 次)
	f4_output_gain_2f	トルク振動抑制・繰り返し制御器への入力値に対するゲイン(2 次)
	f4_input_weight2	トルク振動抑制・入力重み 2
	f4_input_weight1	トルク振動抑制・入力重み 1
	f4_input_weight0	トルク振動抑制・入力重み 0
	f4_suppression_th_1f	トルク振動抑制・抑制目標 (1 次)
	f4_suppression_th_2f	トルク振動抑制・抑制目標 (2 次)
	f4_abnormal_output_th_1f	トルク振動抑制・TF 出力異常度の閾値 (1 次)
	f4_abnormal_output_th_2f	トルク振動抑制・TF 出力異常度の閾値 (2 次)
	st_motor	モータパラメータの構造体
st_current_output_t 電流制御モジュール出力用構造体	u1_flag_offset_calc	電流オフセットフラグ
	u1_flag_charge_bootstrap	ブートストラップ回路への充電終了フラグ
	f4_modu	u 相デューティ比
	f4_modv	v 相デューティ比

構造体	変数	説明
	f4_modw	w 相デューティ比
	f4_neutral_duty	オフセット測定時のデューティ比
	f4_va_max	dq 軸上の最大電圧 [v]
	f4_ref_id_ctrl	d 軸電流指令値
	f4_speed_rad	推定速度 [rad/s]
	f4_ed	d 軸誘起電圧推定値
	f4_eq	q 軸誘起電圧推定値
	f4_phase_err_rad	角度誤差 [rad]
st_current_input_t 電流制御モジュール入力用構造体	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	f4_iu_ad	u 相電流値 [A]
	f4_iv_ad	v 相電流値 [A]
	f4_iw_ad	w 相電流値 [A]
	f4_vdc_ad	母線電圧値 [V]
	f4_id_ref	d 軸電流指令値 [A]
	f4_iq_ref	q 軸電流指令値 [A]
	f4_ol_speed_rad	オープンループ速度 [rad/s]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	速度指令値 [rad/s]
st_bemf_observer_cfg_t 誘起電圧オブザーバモジュール入力用構造体	f4_e_obs_omega_hz	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
	f4_e_obs_zeta	誘起電圧推定系減衰係数
	f4_pll_est_omega_hz	位置推定系固有周波数 [Hz]
	f4_pll_est_zeta	位置推定系減衰係数

表 9-22　速度制御モジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_speed_control_t 速度モジュール用構造体	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	u1_active	モジュールの有効/無効選択
	u1_state_speed_ref	速度指令値を決定するステート管理。本節のマクロに記載するステートを管理します。
	u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の有効/無効
	u1_flag_switching	センサレスへの切り替えフラグ
	u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の有効/無効
	f4_speed_ctrl_period	速度ループの周期 [s]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	制御用の速度指令値 [rad/s]

	f4_ref_speed_rad	速度指令値 [rad/s]
	f4_ref_speed_rad_manual	速度制御時のユーザの速度指令値設定値 [rad/s]
	f4_speed_rad_ctrl	速度（LPF 適用後） [rad/s]
	f4_speed_rad	速度モジュールへの入力速度 [rad/s]
	f4_max_speed_rad	最大速度 [rad/s]
	f4_speed_rate_limit_rad	速度の変化量の制限値 [rad/s]
	f4_id_ref_output	d 軸電流指令値 [A]
	f4_iq_ref_output	q 軸電流指令値 [A]
	f4_va_max	dq 軸上の最大電圧 [V]
	f4_id_ad	d 軸電流値 [A]
	f4_iq_ad	q 軸電流値 [A]
	f4_opl2less_sw_time	センサレス制御へのソフトスイッチング切り替え時間 [s]
	f4_torque_current	トルク電流 [A]（センサレス制御へのソフトスイッチング演算で使用）
	st_motor	モータ定数用構造体
	st_pi_speed	PI 制御用構造体
	st_fluxwkn	弱め磁束制御構造体
	st_opl_damp	オープンループダンピング制御構造体
	st_1st_order_lpf_t	LPF 用構造体
	st_mtpa	MTPA 構造体
st_speed_cfg_t t 速度モジュール制御パラメータ設定用構造体	u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の有効/無効
	u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の有効/無効
	f4_max_speed_rpm	最大速度 [r/min] (機械角)
	f4_speed_ctrl_period	速度制御の周期 [s]
	f4_speed_rate_limit_rpm	速度の変化量の制限値 [r/min] (機械角)
	f4_speed_omega_hz	速度制御系固有周波数 [Hz]
	f4_speed_zeta	速度制御系減衰係数
	f4_speed_lpf_hz	速度制御用 LPF [Hz]
	f4_opl2less_sw_time	センサレス制御へのソフトスイッチング切り替え時間 [s]
	f4_ed_hpf_omega	ダンピング制御・HPF 固有周波数[Hz]
	f4_ol_damping_zeta	ダンピング制御・減衰係数
	f4_ol_damping_fb_limit_rate	ダンピング制御・フィードバック制限率
	f4_ol_ref_id	オープンループ電流
	f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]

	st_motor	モータ定数用構造体
st_speed_input_t 速度モジュール入力用構造体	u1_state_speed_ref	速度指令ステータス
	f4_speed_rad	入力する速度 [rad/s]
	f4_va_max	dq 軸における最大電圧 [V]
	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
st_speed_output_t 速度モジュール出力用構造体	f4_id_ref	d 軸電流指令値 [A]
	f4_iq_ref	q 軸電流指令値 [A]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	PI 制御に使用する速度 [rad/s]
	f4_speed_rad_lpf	LPF 後の速度 [rad/s]

9.7.9　マクロ定義

マネージャモジュールのマクロ一覧を表 9-23 に示します。

表 9-23　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_motor_sensorless_vector_api.h	MOTOR_LOOP_POSITION	0	位置制御モード。 ※本サンプルプログラムでは未対応。
	MOTOR_LOOP_SPEED	1	速度制御モード。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_NONE	0x0000	エラーステータス。エラーなし状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_HW	0x0001	エラーステータス HW 過電流エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_VOLTAGE	0x0002	エラーステータス。過電圧エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_SPEED	0x0004	エラーステータス。過速度エラー状態。
	MOTOR_ERROR_HALL_TIMEOUT	0x0008	ホール信号タイムアウトエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)
	MOTOR_ERROR_BEMF_TIMEOUT	0x0010	誘起電圧検出タイムアウトエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)
	MOTOR_ERROR_HALL_PATTERN	0x0020	ホール信号パターンエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)
	MOTOR_ERROR_BEMF_PATTERN	0x0040	誘起電圧検出パターンエラー (センサレスベクトル制御では発生しません)
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_LOW_VOLTAGE	0x0080	エラーステータス。低電圧エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_SW	0x0100	エラーステータス。SW の過電流エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_STALL_DETECTED	0x0200	エラーステータス。脱調を検知。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_UNKNOWN	0xffff	エラーステータス。エラーコード不明のエラー状態。
r_motor_sensorless_vector_manager.h	MOTOR_MODE_INIT	0x00	初期化を行います。動作モード。
	MOTOR_MODE_BOOT	0x01	駆動準備を行います。動作モード。
	MOTOR_MODE_DRIVE	0x02	モータ駆動状態の動作モード。
	MOTOR_MODE_ANALYSIS	0x03	Analysis モード(未使用)
	MOTOR_MODE_TUNE	0x04	Tuning モード(未使用)

r_motor_sensorless_vector_api.h	MOTOR_CTRL_TYPE_POS	0	制御方式切り替え用マクロ。位置制御モード。
	MOTOR_CTRL_TYPE_SPEED	1	制御方式切り替え用マクロ。速度制御モード。

10. パラメータの設定

10.1 概要

本サンプルプログラムでは、パラメータは以下のヘッダファイル内でマクロ定義されています。マクロ定義されたパラメータは、起動時の初期化ルーチンで、各機能モジュールで管理される変数・構造体に設定され、各々の処理に使用されます。

一部のパラメータは、RMW 等から動的に変更が可能です。変更を行った場合には、パラメータアップデートの関数をコールし、反映させる必要があります。詳細は、各機能モジュールの説明を参照してください。

表 10-1　パラメータ設定ファイルの一覧

マクロ名	説明
r_motor_module_cfg.h	モータ制御に関するパラメータの初期値を定義しています。
r_motor_inverter_cfg.h	インバータに関するパラメータの初期値を定義しています。
r_motor_targetmotor_cfg.h	モータに関するパラメータの初期値を定義しています。

10.2 MCU 関連パラメータ

MCU の周辺機能に関連するパラメーター覧を表 10-2 に示します。FSP または SC を用いてマイコンのペリフェラル設定を変更した場合、これらのパラメータで該当する個所は変更を行う必要があります。

表 10-2　MCU 関連パラメータの一覧

ファイル名	マクロ名	RA ファミリ MCU 設定値	RX26T 設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	MOTOR_MCU_CFG_PWM_TIMER_FREQ	RA4T1, RA6T3 : 100.0 RA6T2, RA8T1 : 120.0 RA8T2 : 250	120.0	PWM のタイマ周波数 [MHz]
	MOTOR_MCU_CFG_CARRIER_FREQ	20.0	20.0	キャリア周波数 [kHz]
	MOTOR_MCU_CFG_INTR_DECIMATION	0 (RA4T1 のみ 1)	0	キャリア割り込みの間引き回数
	MOTOR_MCU_CFG_AD_FREQ	RA4T1, RA6T3 : 50.0 RA6T2, RA8T1 : 60.0 RA8T2 : 41.447	60.0	ADC の動作周波数 [MHz]

	MOTOR_MCU_CFG_AD_SAMPLING_CYCLE	(6 + 39)	(6 + 39)	ADC のサンプリング周期 [cycle]
	MOTOR_MCU_CFG_AD12BIT_DATA	4095.0	4095.0	ADC の分解能
	MOTOR_MCU_CFG_ADC_OFFSET	0x7FF	0x7FF	ADC のオフセット値

10.3 制御機能の設定パラメータの一覧

モータ制御プログラムに備わっている機能の有効無効を設定するパラメータを、表 10-3、表 10-4、表 10-5 に示します。モータ制御の内部で使用される、モータ定数や設定に関する項目は、後述します。

表 10-3　動作パラメータの一覧(全般)

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	MOTOR_TYPE_BLDC	MOTOR_TYPE_BLDC	デフォルトのまま使用ください。
	MOTOR_COMMON_CFG_LOOP_MODE	MOTOR_LOOP_SPEED	デフォルトのまま使用ください。
	MOTOR_COMMON_CFG_OVERCURRENT_MARGIN_MULT	2.0f	過電流のリミット係数
	MOTOR_COMMON_CFG_IA_MAX_CALC_MULT	MTR_SQRT_3	過電流リミット値計算用係数。 √3 を設定してください。
	MOTOR_MCU_CFG_TFU_OPTIMIZE	MTR_ENABLE	TFU 専用関数処理の設定。 自動的に ENABLE となります。

表 10-4　動作パラメータの一覧(速度制御関連)

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_MTPA	MTR_ENABLE	最大トルク/電流制御の設定 有効：MTR_ENABLE 無効：MTR_DISABLE Ld=Lq のモータ(SPM モータ)は必ず MTR_DISABLE にしてください。
	SPEED_CFG_CTRL_PERIOD	0.0005f (RA4T1 のみ 0.001f)	速度制御周期[s]の設定。 0.5ms とするため、0.0005f を設定してください。

表 10-5　動作パラメータの一覧(電流制御関連)

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_VOLT_ERR_COMP	MTR_ENABLE	電圧誤差補償機能の有効・無効設定です。MTR_ENABLE を設定してください。
	CURRENT_CFG_MODULATION_METHOD	MOD_METHOD_SVPWM	10.6 を参照してください。 通常、 MOD_METHOD_SVPWM を設定してください。
	CURRENT_CFG_OFFSET_CALC_TIME	512 (RA4T1 のみ 1024)	電流オフセットの測定時間設定。
	CURRENT_CFG_CHARGE_BOOTSTRAP_TIME	144 (RA4T1 のみ 288)	ブートストラップ回路への充電時間[cnt] 【注】 。

【注】 ユーザのインバータボードが、上下アームに N チャネルと P チャネルを組み合わせた相補型のような場合、ブートストラップ回路が不要な場合があります。その場合は 0 を設定してください。

10.4 保護関連パラメータ

モータを運転する際に、安全性を担保するための保護機能のパラメータを以下に示します。

表 10-6　モータパラメータ、インバータパラメータ設定

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_inverter_cfg.h	INVERTER_CFG_CURRENT_LIMIT	21.4	インバータボードの過電流の制限値 [A]
	INVERTER_CFG_OVERVOLTAGE_LIMIT	60.0	過電圧制限 [V]
	INVERTER_CFG_UNDERVOLTAGE_LIMIT	8.0	低電圧制限 [V]

INVERTER_CFG_CURRENT_LIMIT

インバータが出力可能な最大の電流値から、安全マージンをとった電流値を設定します。

INVERTER_CFG_OVERVOLTAGE_LIMIT

過電圧保護が動作する電圧を設定します。インバータ母線電圧が、設定した電圧超となると、エラーとなり、モータの動作が停止します。ご使用される電源環境に合わせて設定してください。

INVERTER_CFG_UNDERVOLTAGE_LIMIT

低電圧保護が動作する電圧を設定します。インバータ母線電圧が、設定した電圧未満となると、エラーとなり、モータの動作が停止します。ご使用される電源環境に合わせて設定してください。

10.5 モータ制御用 PWM キャリア周波数の変更

モータ制御用 PWM キャリア周波数は、FSP/SC による設定と、r_motor_module_cfg.h で定義されている MOTOR_MCU_CFG_CARRIER_FREQ の定数で設定されています。PWM キャリア周波数を変更した場合、表 10-7 に示す変更箇所を修正してください。PWM キャリア周波数の設定値に合わせて、パラメータの調整が必要となるパラメータがあります。

本サンプルプログラムのモータ制御におけるデフォルト PWM キャリア周波数は、20.0kHz です。

表 10-7 PWM キャリア周波数を変更した場合に変更を行う個所

項目	変更箇所
デッドタイム値	10.7 インバータパラメータを参照
キャリア周波数	・11.5 および 12.6 に記載の FSP/SC のモータ設定で PWM キャリア周波数を設定 ・10.2 に記載の MOTOR_MCU_CFG_CARRIER_FREQ
モータ制御関連	・電流制御パラメータ ・センサレス制御パラメータ ・フライングスタート ・トルク振動抑制 ・脱調検知

10.6 パルス変調方法の設定

本サンプルプログラムでは、パルス幅変調駆動方式を２種類から設定することができます。デフォルトは空間ベクトル PWM(MOD_METHOD_SVPWM)となります。変調機能のコンフィグ情報一覧を表 10-8 に示します。

パルス幅変調駆動方式を、正弦波 PWM に変更した場合、電圧利用率が 86%に制約され、モータに適切な電圧が出力できず、所望の電圧を得るにはインバータ母線電圧を高く設定する必要があります。空間ベクトル PWM を使用した場合、電圧利用率はインバータ母線電圧に対して 100%利用できます。

表 10-8　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_MODULATION_METHOD	(MOD_METHOD_SVPWM)	パルス幅変調駆動方式

表 10-9　パルス幅変調駆動方式の設定項目

パルス幅変調駆動方式の設定項目	値	パルス幅変調駆動方式
MOD_METHOD_SPWM	0	正弦波 PWM
MOD_METHOD_SVPWM	1	空間ベクトル PWM

パルス変調には、以下の設定項目があります。通常は、デフォルト値のままでご使用ください。

表 10-10　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_current_modulation.h	MOD_DEFAULT_MAX_DUTY	1.0	最大 PWM デューティ比。通常は 1.0f のままとしてください。
	MOD_VDC_TO_VAMAX_MULT	0.6124	インバータ母線電圧で出力可能な最大電圧を得るための変換係数
	MOD_SVPWM_MULT	1.155	空間ベクトル PWM を使用した場合のみ。空間ベクトル PWM 係数

10.7 インバータパラメータ

10.7.1 概要

サンプルプログラムを使用する際に、インバータの情報を正しく設定する必要があります。サンプルプログラムで設定されているインバータパラメータを表 10-11 に示します。

表 10-11　インバータパラメータ設定

ファイル名	マクロ名	RA ファミリ 設定値	RX26T 設定値	説明
r_motor_inverter_cfg.h	INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST	0.01	0.01	シャント抵抗値 [ohm]
	INVERTER_CFG_DEADTIME	1.0	1.0	デッドタイム [us]
	INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN	22.2766	22.2766	電圧検出用係数
	INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN	20.0	20.0	電流検出用アンプのゲイン
	INVERTER_CFG_INPUT_V	24.0	24.0	入力電圧 [V]
	INVERTER_CFG_ADC_REF_VOLTAGE	3.3	5.0	MCU のアナログ電源電圧 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V0	0.096		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V1	0.192		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V2	0.288		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V3	0.384		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V4	0.480		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_I0	0.07		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I1	0.14		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I2	0.22		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I3	0.30		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I4	0.50		電圧誤差補償用係数 [A]

INVERTER_CFG_DEADTIME

インバータの仕様書・設計書に記載された、デッドタイム時間を us(マイクロ秒)単位で指定してください。MCI-LV-1 インバータでは、1.0us が指定されています。

INVERTER_CFG_INPUT_V

直流安定化電源が供給する DC 電圧値 24V をデフォルトとしています。

INVERTER_CFG_ADC_REF_VOLTAGE

MCU のアナログ電圧を指定します。RA ファミリ CPU ボードは 3.3V、RX26T CPU ボードは 5.0V となります。

INVERTER_CFG_COMP_Vx, INVERTER_CFG_COMP_Ix

10.7.4 を参照してください。

10.7.2 電流検出ゲイン

MCI-LV-1 インバータでは、RA ファミリ MCU は表 10-12、RX26T は表 10-13 に示すように、電流の大きさによって、ADC に入力される電圧値が規定されています。

本サンプルプログラムで、電流の検出を設定するには、INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN と、INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST を使用します。

INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN

ADC に入力される電圧 1V あたり何 A の電流に相当するかを決める電流アンプのゲインを設定します。電流アンプのゲインは電流検出回路に依存し、MCI-LV-1 ユーザーズマニュアル (R12UZ0092) にある通りデフォルトのゲイン値は 20 です。

INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST

シャント抵抗で使用している抵抗値を設定します。MCI-LV-1 インバータの電流検出回路に使用されているシャント抵抗は 0.01ohm です。電流検出回路についての詳細は MCI-LV-1 ユーザーズマニュアル (R12UZ0092) を参照してください。シャント抵抗を使わずにホール CT を使用する場合には、1.0 を指定してください。

INVERTER_CFG_ADC_REF_VOLTAGE

RA ファミリ MCU では、ADC 基準電圧が 3.3V のため、3.3 を設定してください。RX26T MCU では、ADC 基準電圧が 5.0V のため、5,0 を設定してください。

ADC に入力される 1V あたり電流何 A に相当するかは下記の式で表されます。

$$INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN = \frac{1}{INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST[\Omega]} \times \frac{1}{1V\,あたりの電流値[A/V]}$$

MCI-LV-1 インバータを使用する本サンプルプログラムでは、1V あたりの電流値は 5A です。これにより電流検出レンジは、RA ファミリ MCU の場合、5A/V × 3.3V = 16.5 A (peak-to-peak)、±8.25 A となり、RX26T MCU の場合は 5A/V × 5.0V = 25.0 A (peak-to-peak)、±12.5 A となります。

以下は RA6T2（基準電圧 3.3V）の使用を想定しています。

表 10-12　MCI-LV-1 の電流信号仕様(3.3V 系 MCU RA6T2 の場合)

3 相出力電流値	ADC 入力電圧値	ADC 変換値
+8.25A	3.3V	4095
0A	1.65V	2047
-8.25A	0.0V	0

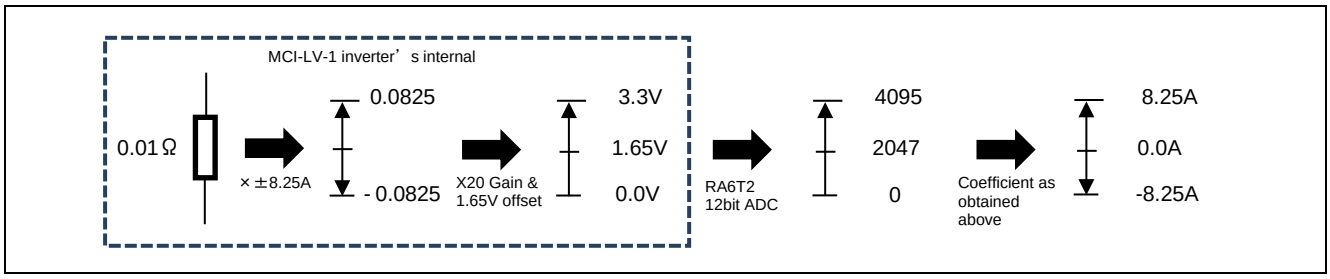


図 10-1　電流検出の計算の流れ(3.3V 系 MCU RA6T2 の場合)

以下は RX26T（基準電圧 5.0）の使用を想定しています。

表 10-13　MCI-LV-1 の電流信号仕様(5.0V 系 MCU RX26T の場合)

3 相出力電流値	ADC 入力電圧値	ADC 変換値
+12.5A	5.0V	4095
0A	2.5V	2047
-12.56A	0.0V	0

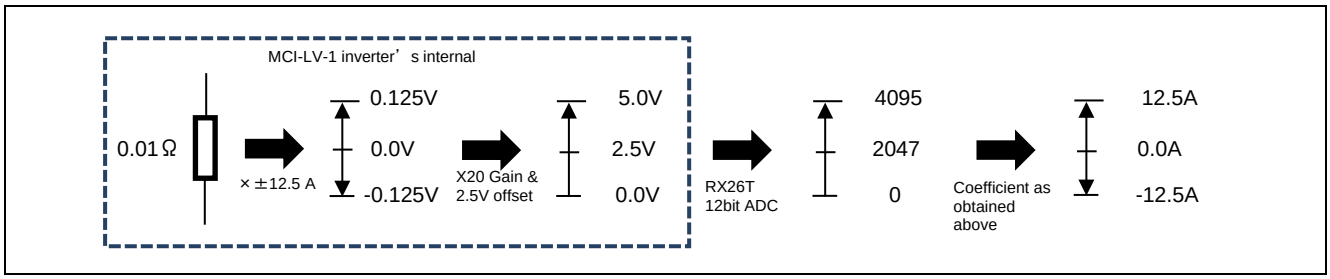


図 10-2　電流検出の計算の流れ(5.0V 系 MCU RX26T の場合)

10.7.3 電圧検出ゲイン

電圧検出ゲインは、INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN で設定します。以下、10.7.2 章と同様に RA ファミリ MCU を想定して、基準電圧を 3.3V で記述します。RX26T 使用の場合は、基準電圧は 5.0V と想定してください。

ADC で入力する電圧 1V あたり、インバータ母線電圧で何 V に相当するかを求める係数を設定します。

MCI-LV-1 インバータを RA ファミリ MCU と組み合わせて使用する場合、ADC 入力電圧 3.3V は検出電圧 73.51V に相当します（この比率は入力電源 DC24V のインバータボードの回路に依存します）。これがインバータ母線電圧の基準です。RX26T で使用する場合は、ADC 入力電圧 5.0V、インバータ母線電圧の基準は 111.383V です。

The INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN は下記の式より求めることができます。

RA ファミリ MCU

$$\text{INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN} = \frac{\textit{インバータ母線電圧の基準}}{\textit{基準となるときのADC入力電圧}} = \frac{73.51}{3.3} = 22.276$$

RX26T MCU

$$\text{INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN} = \frac{\textit{インバータ母線電圧の基準}}{\textit{基準となるときのADC入力電圧}} = \frac{111.383}{3.3} = 22.276$$

上記より、INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN には 22.276 を設定します。

表 10-14　MCI-LV-1 のインバータ母線電圧信号仕様

インバータ母線電圧値		ADC 入力電圧値		ADC 変換値
0.0V		0.0V		0
RA ファミリ MCU	73.51 V	RA ファミリ MCU	3.3 V	4095
RX26T MCU	111.383 V	RX26T MCU	5.0 V	

10.7.4 電圧誤差補償パラメータ

電圧誤差補償の機能の使用及び設定方法について説明します。以下の 3 点の設定が必要となります。

① デッドタイム値の選定

インバータに使用されているパワー半導体の特性およびゲート駆動回路の設計により、デッドタイム値は決定されます。Si-MOSFET を使用している場合、概ね 0.5～1 us 前後が使用されます。FSP/SC のモータ設定に入力場所が用意されていますので、選定したデッドタイム値を反映させてください。本サンプルプログラムでは、キット付属のインバータボード (RTK0EM0000B12020BJ) の特性により、1.0μs に設定しています。

② 電圧誤差機能有効フラグの設定

電流制御モジュールの制御パラメータ設定(R_MOTOR_CURRENT_ParameterUpdate)呼び出し時に、電圧誤差補償機能の有効/無効フラグ(u1_flag_volt_err_comp_use)を MTR_FLG_SET に設定することで機能が有効になります。無効にする場合は、上記フラグを MTR_FLG_CLR に設定してください。

③ 電圧補償テーブルの設定

実機のインバータで、電流を流したスイッチング試験を行うか、デッドタイムとキャリア周期の関係から求まるデッドタイム分の電圧誤差値を用いて、電圧補償テーブルを作成します。スイッチング試験で得られた電流と電圧の関係が求まると、より効果的な電圧補償テーブルとなります。
また、補償電圧値のリミットは以下の式で計算できます。

補償電圧リミット =（キャリア周期 [kHz] × デッドタイム時間 [us] ÷ 1000）× 母線電圧値

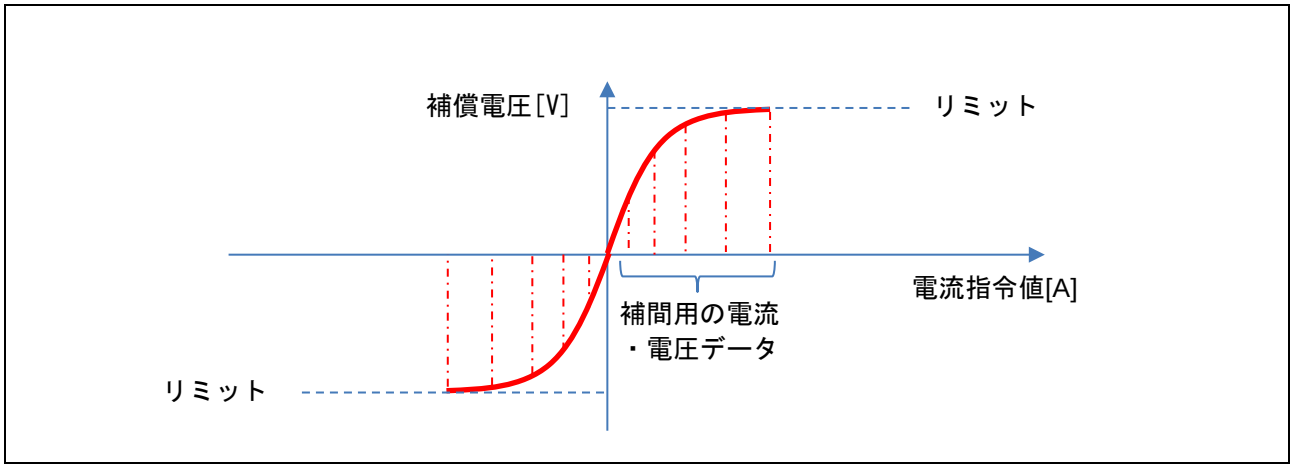


図 10-3　補償電圧値とリミット、電流指令値の関係

表 10-15　キャリア周期と補間用の電流・電圧データ

キャリア周期		20kHz
	Iu	ΔVu
0	0.00	0.000
1	0.07	0.096
2	0.14	0.192
3	0.22	0.288
4	0.30	0.384
5	0.50	0.480

10.8 モータパラメータ

モータの製造者から、モータパラメータの情報が得られない場合、LCR メータを用いて R,Ld,Lq のモータパラメータを簡易的に得ることができます。また、オシロスコープを用いることで、簡易的に誘起電圧を得ることができます。ここで説明した方法は、磁気飽和などを考慮せず、またモータを速やかに回す事を考慮した、簡易的な方法であり、個体差や測定誤差を含んでいます。このため、実際の製品開発でパラメータを使用する際には、精度を担保した測定設備を用いて、測定を行ってください。

LCR メータは、定期的に校正をされたもので、電源を起動して 30 分以上経過させたウォーミングアップ完了状態で測定してください。また、4 端子法を用いて、プローブの誤差を低減するため、オープン補正とショート補正をあらかじめ行ってください。詳細は、LCR メータの取扱説明書を参照してください。

サンプルプログラムを使用する際に、インバータの情報と使用するモータの情報を正しく設定する必要があります。サンプルプログラムの設定値を表 10-16 に示します。

表 10-16　モータパラメータ設定

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_targetmotor_cfg.h	MOTOR_CFG_POLE_PAIRS	4	極対数
	MOTOR_CFG_MAGNETIC_FLUX	0.0115f	磁束 [wb]

	MOTOR_CFG_RESISTANCE	1.32f	抵抗 [ohm]
	MOTOR_CFG_D_INDUCTANCE	0.0021f	d 軸のインダクタンス [H]
	MOTOR_CFG_Q_INDUCTANCE	0.0021f	q 軸のインダクタンス [H]
	MOTOR_CFG_ROTOR_INERTIA	0.0000032f	ロータのイナーシャ [kg m^2]
	MOTOR_CFG_NOMINAL_CURRENT_RMS	1.13f	定格電流 [A]
	MOTOR_CFG_MAX_SPEED_RPM	2400.0f	最大速度 [r/min]

MOTOR_CFG_POLE_PAIRS

PM モータの極対数を設定します。極対数は、極数を 1/2 した値となります。PM モータの仕様書を参照してください。

MOTOR_CFG_RESISTANCE

LCR メータで測定する際の配線は、モータの三相出力線 U,V,W のうち、２つを選び、プローブをつなげてください。抵抗値を求める場合は、直流抵抗(DCR)のモードを用いて、測定します。得られた抵抗値は、２相分の合成抵抗となっていますので、1/2 をすることで、1 相分のモータの抵抗値を得ることができます。得られた抵抗 R は、r_motor_targetmotor_cfg.h の MOTOR_CFG_RESISTANCE に設定してください。単位はΩとなります。

MOTOR_CFG_D_INDUCTANCE, MOTOR_CFG_Q_INDUCTANCE

LCR メータで測定する際の配線は、モータの三相出力線 U,V,W のうち、２つを選び、プローブをつなげてください。計測モードは、直列等価回路モード(Ls)で行います。詳細な測定方法は、LCR メータの取扱説明書を参照ください。

軸をゆっくり回し、表示されるインダクタンスの最大値と最小値をメモします。このとき、最大値の 1/2 が、Lq となり、最小値の 1/2 の値が Ld となります。

得られた Ld 及び Lq は、r_motor_targetmotor_cfg.h の MOTOR_CFG_D_INDUCTANCE, MOTOR_CFG_Q_INDUCTANCE に設定してください。単位は H(ヘンリー)です。

MOTOR_CFG_ROTOR_INERTIA

モータの回転子・軸のイナーシャ（慣性モーメント）を設定します。単位は、kg m^2 です。通常、モータに添付された資料に記述があります。負荷を取り付ける場合には、負荷側のイナーシャも加えて設定してください。

MOTOR_CFG_NOMINAL_CURRENT_RMS

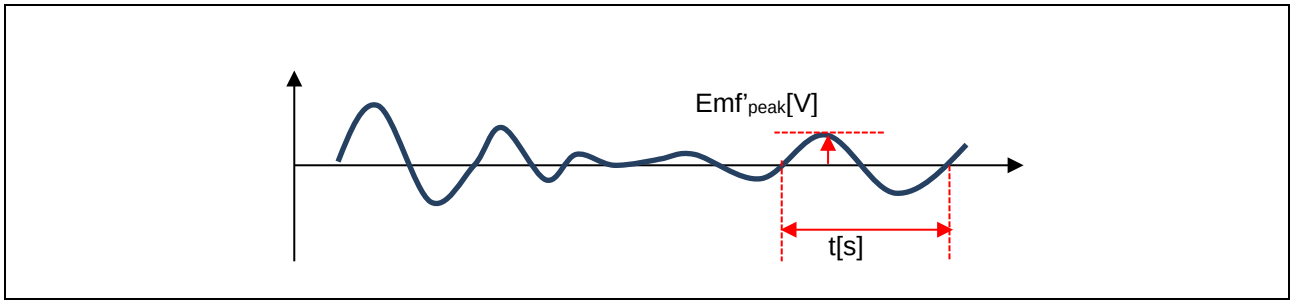
モータの定格電流(実効値)を設定してください。単位はアンペアです。モータの銘板または添付資料に記載されています。

MOTOR_CFG_MAGNETIC_FLUX

モータの三相出力線 U,V,W のうち、２つを選び、オシロスコープにつなげてください。例えば、U 相と V 相を、オシロスコープのプローブを当てて、電圧を測れるようにします。モータの軸の先には、定格速度で回転できるモータを繋げて定格速度で回転させると、U-V 相の線間電圧値が得られます。線間電圧値を√3 で割ることで、相あたりの誘起電圧のピーク値が得られます。鎖交磁束数Ψは、誘起電圧=ωΨ　の式から

求められますから、定格速度を電気角速度の周波数 f[Hz]に換算し、ω=2πf に置き換え、誘起電圧=2πfΨとなり、式を変形し、値を代入することで鎖交磁束Ψ[Wb]が得られます。

軸の先にモータを取り付けできない等の場合には、精度は保証されず、試運転目的のみでの利用となりますが、手で素早く回転させ、電圧波形を取得して簡易的に求める手法も使用できます。手で回した際に、以下のようなイメージで電圧波形が得られますが、このとき、正弦波で一定速に近い周期を選び、電圧のピークと周期を求めます。



本アルゴリズムではピーク値を実効値に換算する必要があるため√2 で割って実効値 Emf'rms を得ます。

$$Emf'_{rms}[V] = Emf'_{peak}[V] \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$

得られた時間 t[s]を Hz に直すため、f'=1/t の式にあてはめます。得られた f[Hz]と、この PM モータの定格速度から得られる電気角周波数[Hz]の比を求め、同時に得られた電圧 Emf'rms[V]に比を掛け算します。

$$Emf[V] = Emf'_{rms}[V] \times \frac{電気角周波数[Hz]}{f'[Hz]}$$

この結果、この PM モータの定格速度で回転した時に発生する、誘起電圧[V]が簡易的に求められます。実際に誘起電圧を求める場合には、負荷試験装置を使って、定格速度でモータの軸を回転させて測定する必要があります。

次に誘起電圧から、磁束鎖交数Ψ[Wb]を求めます。一般的に、誘起電圧と磁束鎖交数には以下のような関係式があります。f は、定格速度時の電気角周波数[Hz]です。

$$Emf[V] = \omega\Psi = 2\pi f\Psi$$

式を変形し、上記で得られた誘起電圧 Emf[V]と、定格速度運転時の電気角周波数[Hz]を代入することで、磁束鎖交数Ψ[Wb]を求められます。

$$\Psi = \frac{Emf[V]}{2\pi f}$$

得られた磁束鎖交数Ψは、r_motor_targetmotor_cfg.h の MOTOR_CFG_MAGNETIC_FLUX に設定してください。

10.9 電流制御パラメータ

電流制御パラメータを、表 10-17 に示します。モータのパラメータや PWM キャリア周波数、所望の電流応答性能によって、電流制御のパラメータを算出します。

表 10-17 に示す電流制御パラメータのマクロは、起動時に内部の変数に設定・反映されますが、起動後に調整が必要な場合には、RMW から調整することが可能なパラメータが、用意されています。表 6-4 を参照してください。すべてのパラメータを変更できるものではありませんので、ご注意ください。

表 10-17　電流制御パラメータの一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_OFFSET_CALC_TIME	512 (RA4T1 のみ 256)	電流オフセットの測定時間設定
	CURRENT_CFG_OMEGA	300.0f	電流制御系固有周波数[Hz]
	CURRENT_CFG_ZETA	1.0f	電流制御系減衰係数

CURRENT_CFG_OFFSET_CALC_TIME

起動時に、電流検出のオフセットを測定するときに、オフセット値の測定回数を指定します。通常はデフォルトのままでご利用ください。

CURRENT_CFG_OMEGA, CURRENT_CFG_ZETA

電流制御系固有周波数と電流制御系減衰係数を調整して制御のゲインを調整します。電流制御系固有周波数は、電流制御を行う頻度に比例して設定してください。電流制御周波数（PWM キャリア周波数）の約 1/10 まで設定できますが、位置検出と電流検出のノイズなどを考慮し、マージンを設けて低く設定する場合が多くあります。

たとえば、電流制御周波数が 20kHz(50us 間隔で電流制御が動作)のときは、1/10 まで設定できますので、電流制御系固有周波数は 2kHz を指定できます。しかし、実際には、モータのパラメータの電気定数に起因して、固有周波数が高いと敏感に反応しすぎる場合があり、2kHz よりも下の周波数(たとえば 500Hz～1kHz)程度に設定することが多いです。

電流制御系減衰係数は、0.7～1.0 が常用範囲です。1.0 に近いほど安定で緩やかな応答になります。

10.10 最大トルク/電流制御

最大トルク/電流制御は、突極性のある PM モータ(Lq>Ld の関係が成り立つ PM モータ)において、出力可能なトルクを最大に調整するためのアルゴリズムです。機能の有効無効は、SPEED_CFG_MTPA で設定します。通常は、有効としてください。

Ld と Lq の値が同じ、またはほぼ同等の PM モータには使用できません。使用できないモータを使っている場合には、必ず最大トルク/電流制御を無効(MTR_DISABLE)にしてください。

表 10-18　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_MTPA	MTR_ENABLE	最大トルク/電流制御を使用する場合には、(MTR_ENABLE)を設定してください。使用しない場合には、(MTR_DISABLE)を設定してください。

10.11 速度制御パラメータ

速度制御系のパラメータを、表 10-19 に示します。設定した値が初期値となり、システム起動時に適用されます。表 10-19 に示す速度制御パラメータのマクロは、起動時に内部の変数に設定・反映されますが、起動後に調整が必要な場合には、RMW から調整することが可能なパラメータが用意されています。表 6-4 を参照してください。RMW 上で、すべての速度制御パラメータを変更できるものではありませんので、ご注意ください。

表 10-19　速度制御パラメータの一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_CTRL_PERIOD	0.0005f (RA4T1 のみ 0.001f)	制御周期設定 [s]
	SPEED_CFG_OMEGA	5.0f	速度制御系固有周波数 [Hz]
	SPEED_CFG_ZETA	1.0f	速度制御系減衰係数
	SPEED_CFG_LPF_OMEGA	25.0f	速度制御系の LPF 帯域 [Hz]
	SPEED_CFG_SPEED_LIMIT_RPM	4500.0f	速度制限値[r/min]（機械角）
	SPEED_CFG_RATE_LIMIT_RPM	1000.0f	加速度制限 [r/min/s]

SPEED_CFG_CTRL_PERIOD

0.0005s(0.5ms)としてください。変更する場合には、11.5 の AGT0 タイマ設定値を変更し、速度制御周期を変更することとなります。

SPEED_CFG_OMEGA, SPEED_CFG_ZETA

速度制御モジュールでは、速度制御系固有周波数と速度制御系減衰係数を調整して制御のゲインを調整します。速度制御系固有周波数を高くすると、応答性が向上し指令速度に対する速度の追従性が向上します。速度制御系固有周波数は電流制御との干渉を防ぐため、設定できる上限は、電流制御系の固有周波数の 1/3 以下にしてください。電流制御系の固有周波数が 500Hz であった場合には、500Hz/3=166Hz となります。しかし、本サンプルプログラムでは、エンコーダを使用せずに速度の推定を行っている関係上、CURRENT_CFG_PLL_EST_OMEGA で設定した固有周波数より低い周波数を設定してください。デフォルト値は、追従性を高くせず、マージンを取った値を設定しております。たとえば、外乱が固有周波数より高めで振動する場合には、固有周波数の値を外乱に合わせて増やすことで、外乱の振動への追従性がよくなり、デフォルト設定よりも安定して動く場合があります。

速度制御系減衰係数は 0.7～1.0 は常用範囲とし、値 1.0 に近いほど安定で緩やかな応答になります。速度の応答を確認しながら調整を行ってください。

SPEED_CFG_LPF_OMEGA

推定した速度に対して、フィルタを設定することで、変動を抑制します。値を小さくしすぎると、速度応答性が悪化し、急な速度変化に追従できなくなります。

SPEED_CFG_RATE_LIMIT_RPM

速度指令値を設定した時に、速度が上昇するスピード（加速度）を設定します。値を大きくすると、早く速度が上昇します。100 を指定した時、1 秒当たり 100r/min、上昇します。停止から 2000r/min まで 20 秒で到達します。

10.12 サンプルディレイ補償パラメータ

電流検出タイミングを基準として、実際に PWM が出力されるタイミングまで角度を進ませるための補償値です。本サンプルプログラム及びインバータ構成では、任意のサンプル数を進ませることで、PWM 出力タイミングを一致させることができます。

表 10-20　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_PERIOD_MAG_VALUE	0.5	進み補償を行います。サンプル数を設定します。

10.13 センサレス制御パラメータ

ここでは、センサレス制御に必要なパラメータの設定方法について説明します。センサレス制御は、電流センサと、あらかじめ設定したモータパラメータや制御パラメータを用いて、始動を行います。パラメータが不適切である場合、センサレス制御に不向きなインバータ・モータを用いた場合は、所望の性能を発揮できない場合があります。

(1) オープンループ制御パラメータ

オープンループ制御に用いる、パラメーター覧を表 10-21 に示します。

表 10-21 オープンループ制御の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	単位	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_REF_ID_OPENLOOP	0.5f	A	
	CURRENT_CFG_ID_UP_STEP_TIME	2560.0f (RA4T1 のみ 1280.0f)	cnt	
	CURRENT_CFG_ID_DOWN_STEP_TIME	500.0f (RA4T1 のみ 250.0f)	cnt	
	SPEED_OPL2LESS_SWITCH_TIME	0.025f	sec	
	SPEED_OPL_DAMP_ED_HPF_OMEGA	2.5f	Hz	
	SPEED_OPL_DAMP_ZETA	1.0f	-	
	SPEED_OPL_DAMP_FB_SPEED_LIMIT_RATE	0.5f	-	
	SENSORLESS_VECTOR_ID_DOWN_SPEED_RPM	600.0f	r/min	
	SENSORLESS_VECTOR_ID_UP_SPEED_RPM	400.0f	r/min	
	SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_DEG	10.0f	deg	
	SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_LPF_CUT_FREQ	10.0f	Hz	

CURRENT_CFG_REF_ID_OPENLOOP

オープンループ始動時に d 軸に流す電流値を設定します。定格電流値以下を設定してください。イナーシャが大きいモータの場合には、小さい値に設定するとモータを始動できない場合があります。

運転中に変更する場合には com 変数の com_f4_ol_ref_id で調整が可能です。

CURRENT_CFG_ID_UP_STEP_TIME

オープンループ始動時に d 軸に流す電流を上昇させる際にかかる時間を設定します。単位は 1 電流制御周期を 1cnt とした値です。

CURRENT_CFG_ID_DOWN_STEP_TIME

オープンループ始動時にセンサレスベクトル制御に切り替えるために d 軸に流す電流を下降させる際にかかる時間を設定します。単位は 1 電流制御周期を 1cnt とした値です。

SPEED_OPL2LESS_SWITCH_TIME

オープンループ制御からクローズドループ制御（BEMF オブザーバーによるベクトル制御）に切り替える時間を設定します。

SPEED_OPL_DAMP_ED_HPF_OMEGA

d 軸誘起電圧推定用 HPF のカットオフ周波数 [Hz]を設定します。

SPEED_OPL_DAMP_ZETA

オープンループダンピング制御系減衰係数のデフォルト設定値を設定します。0.8～1.0 の値を設定してください。

SPEED_OPL_DAMP_FB_SPEED_LIMIT_RATE

出力速度指令補償値リミッタ算出用定数のデフォルト設定値です。

SENSORLESS_VECTOR_ID_DOWN_SPEED_RPM

オープンループ制御から誘起電圧オブザーバ制御に切り替える際の機械角速度[r/min]を設定します。

SENSORLESS_VECTOR_ID_UP_SPEED_RPM

誘起電圧オブザーバ制御からオープンループ制御に切り替える際の機械角速度[r/min]を設定します。SENSORLESS_VECTOR_ID_DOWN_SPEED_RPM よりも十分低い速度を設定してください。

SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_DEG

オープンループ制御から誘起電圧オブザーバ制御への切り替え時の角度誤差の閾値です。電気角の角度[deg]で設定してください。

SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_LPF_CUT_FREQ

オープンループ時から誘起電圧オブザーバによるセンサレスベクトル制御に切り替える際に、誘起電圧オブザーバで得られた位相誤差に対して、切り替えを円滑に行うために LPF のカットオフ周波数を設定します。

(2)　中高速域センサレス制御パラメータ

中高速域センサレス制御に用いる誘起電圧オブザーバのパラメータを表 10-22 に示します。

パラメータの設定方法の詳細については、本サンプルプログラムのベースである永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 Evaluation System for BLDC Motor 用(R01AN6307) を参照してください。

表 10-22　中高速域センサレス制御の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_E_OBS_OMEGA	1000 (RA4T1 のみ 750)	誘起電圧オブザーバの固有周波数 [Hz]
	CURRENT_CFG_E_OBS_ZETA	1	誘起電圧オブザーバの減衰係数

	CURRENT_CFG_PLL_EST_OMEGA	10	中高速域センサレス制御用 PLL の固有周波数[Hz]
	CURRENT_CFG_PLL_EST_ZETA	1	中高速域センサレス制御用 PLL の減衰係数

CURRENT_CFG_E_OBS_OMEGA
誘起電圧オブザーバの固有周波数を設定します。電流調節器の CURRENT_CFG_OMEGA の設定値よりも 2～3 倍を目安に離した周波数を設定します。近い値を設定すると、発振して正常に角度を求めることができなくなります。

CURRENT_CFG_E_OBS_ZETA
誘起電圧オブザーバの減衰係数を設定します。通常は 1.0 を設定してください。

CURRENT_CFG_PLL_EST_OMEGA
誘起電圧オブザーバで演算した角度誤差を積算し、角度を算出する PLL の固有周波数を設定します。誘起電圧オブザーバの 1/10 程度の値かつ、速度調節器の SPEED_CFG_OMEGA よりも大きくなる周波数を目安に設定します。設定値を誤ると角度が正常に推定できず、発振する場合があります。

CURRENT_CFG_PLL_EST_ZETA
誘起電圧オブザーバで演算した角度誤差を積算し、角度を算出する PLL の減衰係数を設定します。通常は 1.0 を設定してください。

10.14 弱め磁束制御パラメータ

弱め磁束制御は、使用の有無のみを設定します。その他の制御パラメータはありません。母線電圧や速度の状態を監視し、条件が成立した場合に自動的に制御を開始します。

表 10-23　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_FLUX_WEAKENING	MTR_ENABLE	弱め磁束制を使用する場合には、(MTR_ENABLE)を設定してください。使用しない場合には、(MTR_DISABLE)を設定してください。

10.15 フライングスタートパラメータ

フライングスタートの動作パラメータを説明します。

表 10-24　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_FLYING_START	MTR_DISABLE	始動時にフライングスタート機能を使用する場合、MTR_ENABLE を設定してください。なお、MTR_DISABLE と設定した場合であっても com 変数 com_u1_flag_flying_start_use で後から変更が可能です。

表 10-25　フライングスタートの設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_CURRENT_TH	0.1f	短絡電流の閾値[A]を設定します。

	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OVER_TIME_SEC	0.0009f	
	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OFF_TIME_SEC	0.0001f	
	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_ACTIVE_BRAKE_TIME_SEC	0.005f	
	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_RESTART_SPEED_LIMIT	660.0f	フライングスタートによる再始動を許可させる最低速度を設定します。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_CURRENT_TH

フライングスタート機能における Ton 時間とみなす短絡電流の閾値を設定します。本パラメータによって、Ton 時間が決定されます。

電流検出分解能による回転速度及び磁極位置への推定影響を低減するために、Ton 時間は以下の条件 1, 2 (0.1A <Ia <1.96A) から、検出した電流ベクトル(Ia)が 1.0A になるまで三相下アームを同時 ON させます。Ton 時間が長くなるほど式 7.10.4 の近似誤差が大きくなるため、0.1A を Ton 時間の閾値電流とします。

条件 1	検出電流ベクトルの大きさ(Ia)が電流検出分解能の 100 倍以上を目安に決定してください。例えば MCI-LV-1 インバータボードの電流検出分解能 16.5A/12bit (4.03mA/LSB)とすると、閾値は 4.03mA の 100 倍、0.4A 以上となります。 ただし、短絡電流の立ち上がり時間が配線のインピーダンスやモータ定数の影響で緩やかとなり、フライングスタートの(Ton+Toff)max 条件を満たせない場合には、実験的に電流値を 1/2 程度まで下げてください。 Ton と Toff 時間はモータ停止期間であり、特に Ton 時間ではブレーキがかかり、イナーシャが小さい場合ではモータはすぐに停止してしまいます。よって、実験的に電流値を 1/4 程度まで下げてください。
条件 2	検出電流ベクトルの大きさ(Ia)は、ターゲットモータの定格相電流実効値 × √3 以下であること。ターゲットモータの相電流実効値 1.13A×√3≃1.96A から、検出電流ベクトル(Ia)は 1.96A 以下であること。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OVER_TIME_SEC

短絡電流の閾値に到達するまで待つ最大時間を秒で設定します。この時間を超過すると、停止または低速回転中とみなしてアクティブブレーキを動作させます。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OFF_TIME_SEC

フライングスタートの Toff 時間を設定します。Toff 時間は、以下の条件 1,2(8.25 us <Toff<3.0 ms)を満たせるように Toff=0.1ms とします。

条件 1：dq 軸回転座標系における式 7.10.4 の近似条件 i(0)=0 を満たせるように Ton 時間導通後、三相電流がゼロまで減衰する必要があります。電流ベクトル Ia が 0.1A から 0A まで減衰するまでにおける Toff 時間を回路シミュレーションで行うと、最高回転速度 2400r/min における最大 Toff 時間は約 8.25us となります。よって、Toff > 8.25us になるように設定します。

条件 2：三相下アーム導通開始タイミングから閾値電流 0.1A までの導通時間 Ton は、回路シミュレーションを行うと、最大回転速度 2400r/min において Ton=0.126ms が得られます。このとき、回転速度を時間換算して得られる(Ton+Toff)max は 3.125ms となっていることから、Toff<(3.125-0.126)ms=3.0ms を満たす必要があります。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_ACTIVE_BRAKE_TIME_SEC

フライングスタートで始動できない速度で回転している場合、アクティブブレーキをかけてモータを停止させます。停止させる際のブレーキの動作時間[s]を設定します。

10.16 トルク振動抑制パラメータ

トルク振動抑制機能は、誘起電圧オブザーバによるセンサレスベクトル制御で運転している定常状態時に使用できます。オープンループ制御時や、加減速時には使用できません。オープンループ中や、加減速時でトルク振動抑制制御機能を有効にすると、予期せぬ動作をする可能性があるためご注意ください。また、主に低中速域で使用することや、コンプレッサ等のトルク振動発生源の特性によって、使用条件が異なることから、com_u1_flag_trq_vibration_comp_use の変数を使用して RMW でモータ駆動波形を確認しながら、動作を確認してください。

表 10-26　トルク振動抑制の操作手順

手順	操作内容	RMW の操作
1	速度が定常状態であることを確認する	-
2	トルク振動抑制制御のパラメータを設定	RMW 上で、パラメータ変更を行う 主な調整パラメータは以下の通りです。 ・ 位相進み K_2 [rad]：com_f4_timelead_1f/2f ・ TF 内部の LPF 固有周波数[Hz]：com_f4_tf_lpf_omega ・ 繰り返し制御器への入力ゲイン K_1：com_f4_tf_output_gain_1f/2f ・ 入力信号重み：com_f4_input_weight0/1/2 ・ 抑制目標：com_f4_suppression_th_1f/2f ・ TF 出力異常度閾値：com_f4_abnormal_output_th_1f/2f
3	トルク振動抑制を開始させる	com_u1_flag_trq_vibration_comp_use に 1 をセット RMW の操作手順に沿って、変数を更新する ※上記 com 変数はセンサレスベクトル制御でのみ、ON となるようにしてください。
4	補償信号の生成が終了する	RMW 上で、トルク振動抑制制御のステータスを確認してください。 ステータス：u2_trq_comp_state ※補償信号の発散や、所望の抑制効果を得られない場合には、手順 5 を行った後に、手順 2 に従いパラメータの調整をしてください。
5	速度を変更する必要がある場合、またはトルク振動抑制機能を無効にする場合、トルク振動抑制機能を OFF にする。	com_u1_flag_trq_vibration_comp_use に 0 をセット RMW の操作手順に沿って、変数を更新する
6	速度変更が完了した後、必要に応じて手順 1 に戻る。	-

表 10-27　トルク振動抑制の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_TRQVIB_TARGET_2F	MTR_FLG_SET	0 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分のみ 1 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分と 2 次成分
	CURRENT_CFG_TRQVIB_COMP_MODE	TRQCOMP_MODE_PAT	補償信号の生成方式： TRQCOMP_MODE_LUT TRQCOMP_MODE_PAT
	CURRENT_CFG_TRQVIB_OUTPUT_GAIN_1F	0.005f	K_1：繰り返し制御器への入力値に対するゲイン（回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_OUTPUT_GAIN_2F	0.005f	K_1：繰り返し制御器への入力値に対するゲイン（回転周波数の 2 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_TIMELEAP_1F	0.0f	K_2：位相進み[rad]（回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_TIMELEAP_2F	4.0f	K_2：位相進み[rad]（回転周波数の 2 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_TF_LPF_OMEGA	0.6f	トラッキングフィルタ内部における LPF の固有周波数 [Hz]
	CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_2	1.0f	入力信号の重みづけを設定します。モータや負荷の特性に応じて、設定してください。（LUT 方式のみ）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_1	0.0f	
	CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_0	0.0f	
	CURRENT_CFG_TRQVIB_SUPP_TH_1F	0.05f	抑制目標 X（回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_SUPP_TH_2F	0.1f	抑制目標 X（回転周波数の 2 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_ABNORMAL_TH_1F	0.9f	TF 異常出力度回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_ABNORMAL_TH_2F	0.9f	TF 異常出力度回転周波数の 2 次成分）

CURRENT_CFG_TRQVIB_TARGET_2F
本マクロにより、トルク振動抑制制御の補償対象に回転周波数の 2 次成分を含めるか設定が可能です。
0 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分のみ
1 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分と 2 次成分

CURRENT_CFG_TRQVIB_OUTPUT_GAIN_1F/2F
本マクロは、繰り返し制御器への入力値に対するゲイン K_1 を設定します。 K_1 を大きく設定すると、補償信号学習終了までの時間を短縮できますが、条件によっては補償信号が発散してしまいます。一方で K_1 を小さくすると、繰り返し制御器への入力値が小さくなり、補償信号の学習終了まで時間がかかりますが、安定的な補償信号が期待できます。また、トルク振動抑制の内部アルゴリズムは積分器の要素を持っており、過渡状態の時間は変化しますが、発散しない K_1 における定常状態では、ゲインにかかわらずフィードバック値は同じとなります。

CURRENT_CFG_TRQVIB_TIMELEAP_1F/2F [rad]
出力位相を調整するパラメータです。ラジアンで設定します。範囲は、振動成分の 1 周期換算における 0～2π(6.28)です。

CURRENT_CFG_TRQVIB_TF_LPF_OMEGA [Hz]
TF 内部の LPF のフィルタの固有周波数を設定します。TF 内部の LPF は、直流成分のみを通過させることが目的になりますが、抽出の遅れ等を考慮して設定をしてください。

CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_0,
CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_1,
CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_2
内部のテーブルに格納する際に、移動平均の重みづけを設定します。振動抑制効果の変動が激しい場合は、重みづけを調整してください。（LUT 方式のみ）

CURRENT_CFG_TRQVIB_SUPP_TH_1F /2F
学習終了の判断に用いられる抑制目標 X を設定できます。

$$X = \frac{\textit{抑制後の振動成分振幅値}}{\textit{抑制前の振動成分振幅値}}$$

CURRENT_CFG_TRQVIB_ABNORMAL_TH_1F/2F

学習終了の判断に用いられる TF 出力異常度を設定できます。TF 出力異常度とは、TF 出力における抽出したい振動成分に対する、それ以外の成分を表しています。この TF 出力異常度が 1.0 を超えて学習をし続けてしまうと、所望でない成分を学習してしまいます。そのため、TF 出力異常度の閾値を 1.0 以下に設定することを推奨いたします。なお、異常度の検出は、TF で用いる参照機械角の位相によっては、正確に異常度を計算することができない場合があります。したがって、上記の抑制目標と TF 出力異常度を組み合わせて学習終了判断の調整を行ってください。

10.17 脱調検出パラメータ

脱調検出のパラメータを以下に示します。

表 10-28　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_STALL_DETECTION	MTR_DISABLE	脱調検出機能を使用する場合には、(MTR_ENABLE)を設定してください。使用しない場合には、(MTR_DISABLE)を設定してください。

表 10-29　脱調検知の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_STALL_D_HPF_GAIN	0.00025	d/q 軸電流検出値から、振動成分を抽出するために HPF のゲインを設定します。
	CURRENT_CFG_STALL_Q_HPF_GAIN	0.00025	
	CURRENT_CFG_STALL_THRESHOLD_LEVEL	2.2	脱調とみなす電流レベルの閾値[A]を設定します。
	CURRENT_CFG_STALL_THRESHOLD_TIME	0.1	電流レベルの閾値を超えた時に脱調と判定する時間[s]を設定します。

CURRENT_CFG_STALL_D_HPF_GAIN
CURRENT_CFG_STALL_Q_HPF_GAIN
HPF ゲインは以下の式から求められます。脱調検知の処理が動作する電流制御周期は 50us、HPF の時定数を 8ms としたとき、HPF ゲインは 0.0063 となります。

$$HPFGain = \frac{Tc[sec]}{HPF\ Time[sec]} = \frac{50us}{8ms} = 0.00625 \fallingdotseq 0.0063$$

11. FSP 設定(RA ファミリ MCU 用)

11.1 FSP の概要

RA ファミリ MCU 向けの本サンプルプログラムのソフトウェアアーキテクチャを図 11-1 に示します。FSP は、ADC や GPT、SCI などの MCU 固有のレジスタ設定や割り込みの管理を行います。ハードウェア抽象化レイヤー(HAL)の機能と、ファイルシステムや通信用プロトコルスタックといった、ミドルウェアの機能を包含したソフトウェアパッケージとなっています。

本サンプルプログラムでは、FSP の代表的な機能のうち、タイマや ADC、GPIO などの MCU の周辺機能におけるレジスタ設定や割り込みを抽象化した機能のみを使用しています。モータ制御機能は、アプリケーション層に実装しており、ユーザが自由にモータ制御アルゴリズムやシーケンス等のソフトウェアの変更を行える設計となっています。

FSP では、本サンプルプログラムに類似した「モータミドルウェア」が標準で提供されていますが、本サンプルプログラムとの間にソフトウェア内部構造・関数・パラメータ等のインタフェース互換性は有しておりませんのでご注意ください。

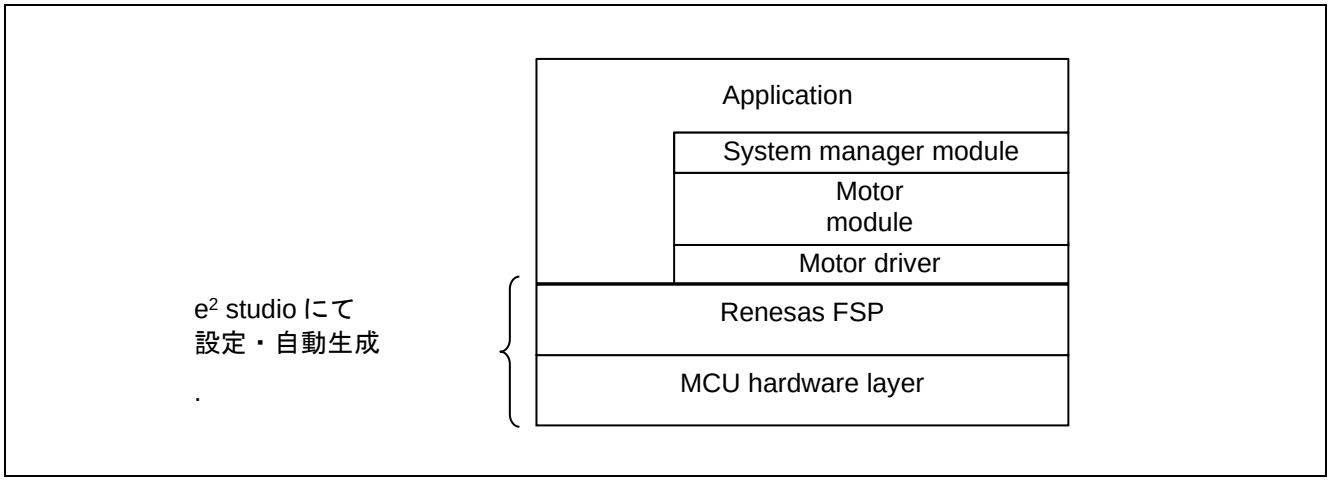


図 11-1　本サンプルプログラムのソフトウェアアーキテクチャ(RA6T2)

11.2 FSP スタック設定

FSP では、周辺機能ごとに機能モジュールを提供しており、「スタック」と呼称しています。本サンプルプログラムで使用する FSP スタックと機能割り当てを表 11-1 に示します。

FSP の Stack Configuration を開いた場合やスタック内部のプロパティを変更した場合、ra_gen フォルダ内の hal_data.c/h 等のファイルが自動生成されます。Generate Project Content を行った場合には、ra フォルダ内の FSP 関連モジュールが自動生成・更新されます。

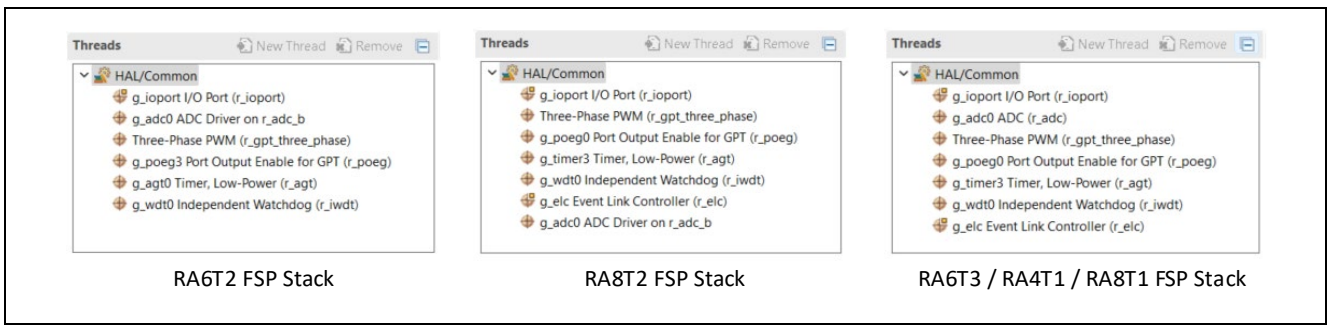


図 11-2　FSP スタックの一覧

表 11-1　FSP スタックと機能割り当て

機能	FSP スタック
3 相 PWM 出力	Three-Phase PWM(r_gpt_three_phase)
モータ用 A/D 変換処理 (U,V,W 相出力電流、インバータ母線電圧、VR 入力の検出)	g_adc0 ADC Driver on r_adc_b g_adc0 ADC（r_adc)
使用ポートの設定	g_ioport I/O Port (r_ioport)
速度制御割り込みタイマ	g_agt0 Timer, Low-Power(r_agt)
過電流検出	g_poeg3 Port Output Enable for GPT (r_poeg)
独立ウォッチドッグタイマ	g_wdt0 Independent Watchdog (r_iwdt)
イベントリンクコントローラ[注]	g_elc Event Link Controller (r_elc)

【注】この機能は RA6T2 では使用しません。

11.3 コールバック・割り込み

FSP では、割り込み処理として呼ばれる関数をコールバック関数として定義します。割り込み一覧を 表 11-2 に示します。

ここに示したコールバック関数は、src/application/main/mtr_main.c に実体が置かれています。

表 11-2　割り込み一覧（3 シャント）（RA ファミリ）

FSP スタック	コールバック関数	説明
g_adc0	callback_gpt_adc_cyclic()	モータ用電流制御周期(20kHz)で使用。コールバック関数内でマスクして分離を行っています。
poeg	callback_poe_overcurrent()	POEG のコールバック関数内では、必ず R_POEG_Reset() をコールしてフラグをリセットしてください。割り込み優先度によっては、その他の処理が停止する場合があります。
agt0	callback_agt_motor_speed_cyclic()	-

11.4 端子設定

端子のインタフェース情報を表 11-3 から表 11-9 に示します。

表 11-3　端子インタフェース（RA6T2）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	PD01	GPIO	-	Low でモータ回転状態ステート
LED2	PD02	GPIO	-	Low でエラー
SW1	PD04	GPIO	-	ボード UI モータ回転・停止スイッチ
SW2	PD07	GPIO		リセットスイッチ
U 相電流検出	PA04	S12AD	AN004	-
V 相電流検出	PA02	S12AD	AN002	-
W 相電流検出	PA00	S12AD	AN000	-
インバータ母線電圧検出	PA07	S12AD	AN007	-
ボリュームスイッチ	P000	S12AD	AN016	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	PC13	POEG	GTETRGD	Low で異常
PWM 出力（U_p）	PB04	GPT	GTIOC4A	Active High
PWM 出力（U_n）	PB05	GPT	GTIOC4B	Active High
PWM 出力（V_p）	PB06	GPT	GTIOC5A	Active High
PWM 出力（Vn）	PB07	GPT	GTIOC5B	Active High
PWM 出力（W_p）	PB08	GPT	GTIOC6A	Active High
PWM 出力（W_n）	PB09	GPT	GTIOC6B	Active High

表 11-4　端子インタフェース（RA6T3）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P113	GPIO	-	Low でモータ回転状態ステート
LED2	P106	GPIO	-	Low でエラー
SW1	P304	GPIO	-	ボード UI のモータ回転・停止スイッチ
SW2	P200	GPIO	-	リセットスイッチ
U 相電流検出	P000	S12AD	AN000	-
V 相電流検出	P001	S12AD	AN001	-
W 相電流検出	P002	S12AD	AN002	-
インバータ母線電圧検出	P004	S12AD	AN004	-
ボリュームスイッチ	P005	S12AD	AN005	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	P104	POEG	GTETRGB	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P409	GPT	GTIOC1A	Active high
PWM 出力（U_n）	P408	GPT	GTIOC1B	Active high
PWM 出力（V_p）	P103	GPT	GTIOC2A	Active high
PWM 出力（V_n）	P102	GPT	GTIOC2B	Active high
PWM 出力（W_p）	P111	GPT	GTIOC3A	Active high
PWM 出力（W_n）	P112	GPT	GTIOC3B	Active high

表 11-5　端子インタフェース（RA4T1）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P113	GPIO	—	Low でモータ回転状態ステート
LED2	P106	GPIO	—	Low でエラー
SW1	P304	GPIO	—	ボード UI のモータ回転・停止スイッチ
SW2	P200	GPIO	—	リセットスイッチ
U 相電流検出	P000	S12AD	AN000	—
V 相電流検出	P001	S12AD	AN001	—
W 相電流検出	P002	S12AD	AN002	—
インバータ母線電圧検出	P004	S12AD	AN004	—
ボリュームスイッチ	P005	S12AD	AN005	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	P104	POEG	GTETRGB	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P409	GPT	GTIOC1A	Active high
PWM 出力（U_n）	P408	GPT	GTIOC1B	Active high
PWM 出力（V_p）	P103	GPT	GTIOC2A	Active high
PWM 出力（Vn）	P102	GPT	GTIOC2B	Active high
PWM 出力（W_p）	P111	GPT	GTIOC3A	Active high
PWM 出力（W_n）	P112	GPT	GTIOC3B	Active high

表 11-6　端子インタフェース（RA8T1）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	PA12	GPIO	—	Low でモータ回転状態ステート
LED2	PA14	GPIO	—	Low でエラー
SW1	PA15	GPIO	—	ボード UI のモータ回転・停止スイッチ
SW2	PA13	GPIO	—	リセットスイッチ
U 相電流検出	P004	S12AD	AN000	—
V 相電流検出	P005	S12AD	AN001	—
W 相電流検出	P006	S12AD	AN002	—
インバータ母線電圧検出	P008	S12AD	AN008	—
ボリュームスイッチ	P014	S12AD	AN007	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	P613	POEG	GTETRGA	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P115	GPT	GTIOC5A	Active high
PWM 出力（U_n）	P609	GPT	GTIOC5B	Active high
PWM 出力（V_p）	P113	GPT	GTIOC2A	Active high
PWM 出力（Vn）	P114	GPT	GTIOC2B	Active high
PWM 出力（W_p）	P300	GPT	GTIOC3A	Active high
PWM 出力（W_n）	P112	GPT	GTIOC3B	Active high

表 11-7　端子インタフェース（RA8T2）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P614	GPIO	—	Low でモータ回転状態ステート
LED2	PA15	GPIO	—	Low でエラー
SW1	PA00	GPIO	—	ボード UI のモータ回転・停止スイッチ
SW2	PA07	GPIO	—	リセットスイッチ
U 相電流検出	P006	S12AD	AN006	—
V 相電流検出	P008	S12AD	AN008	—
W 相電流検出	P010	S12AD	AN010	—
インバータ母線電圧検出	P007	S12AD	AN007	—
ボリュームスイッチ	P015	S12AD	AN015	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	P112	POEG	GTETRGA	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P605	GPT	GTIOC8A	Active high
PWM 出力（U_n）	P604	GPT	GTIOC8B	Active high
PWM 出力（V_p）	P603	GPT	GTIOC7A	Active high
PWM 出力（Vn）	P602	GPT	GTIOC7B	Active high
PWM 出力（W_p）	P612	GPT	GTIOC9A	Active high
PWM 出力（W_n）	P613	GPT	GTIOC9B	Active high

表 11-8　端子インタフェース（RX26T-A）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P21	GPIO	—	Low でモータ回転状態ステート
LED2	P20	GPIO	—	Low でエラー
SW1	P23	GPIO	—	ボード UI のモータ回転・停止スイッチ
SW2	P22	GPIO	—	リセットスイッチ
U 相電流検出	P40	S12AD	AN000	—
V 相電流検出	P41	S12AD	AN001	—
W 相電流検出	P42	S12AD	AN002	—
インバータ母線電圧検出	P43	S12AD	AN003	—
ボリュームスイッチ	P50	S12AD	AN204	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	P70	POEG	GTETRGB / POE0#	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P73	GPT	GTIOC2A	Active high
PWM 出力（U_n）	P76	GPT	GTIOC2B	Active high
PWM 出力（V_p）	P72	GPT	GTIOC1A	Active high
PWM 出力（Vn）	P75	GPT	GTIOC1B	Active high
PWM 出力（W_p）	P71	GPT	GTIOC0A	Active high
PWM 出力（W_n）	P74	GPT	GTIOC0B	Active high

表 11-9　端子インタフェース（RX26T-C）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P65	GPIO	—	Low でモータ回転状態ステート
LED2	PB5	GPIO	—	Low でエラー
SW1	P21	GPIO	—	ボード UI のモータ回転・停止スイッチ
SW2	P20	GPIO	—	リセットスイッチ
U 相電流検出	P40	S12AD	AN000	—
V 相電流検出	P41	S12AD	AN001	—
W 相電流検出	P42	S12AD	AN002	—
インバータ母線電圧検出	P43	S12AD	AN003	—
ボリュームスイッチ	P47	S12AD	AN206	ボード UI 速度指令入力
インバータ HW 過電流検出	P96	POEG	GTETRGB / POE4#	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P71	GPT	GTIOC0A	Active high
PWM 出力（U_n）	P74	GPT	GTIOC0B	Active high
PWM 出力（V_p）	P72	GPT	GTIOC1A	Active high
PWM 出力（Vn）	P75	GPT	GTIOC1B	Active high
PWM 出力（W_p）	P73	GPT	GTIOC2A	Active high
PWM 出力（W_n）	P76	GPT	GTIOC2B	Active high

11.5 3 相 PWM GPT 設定

モータ制御に使用します。

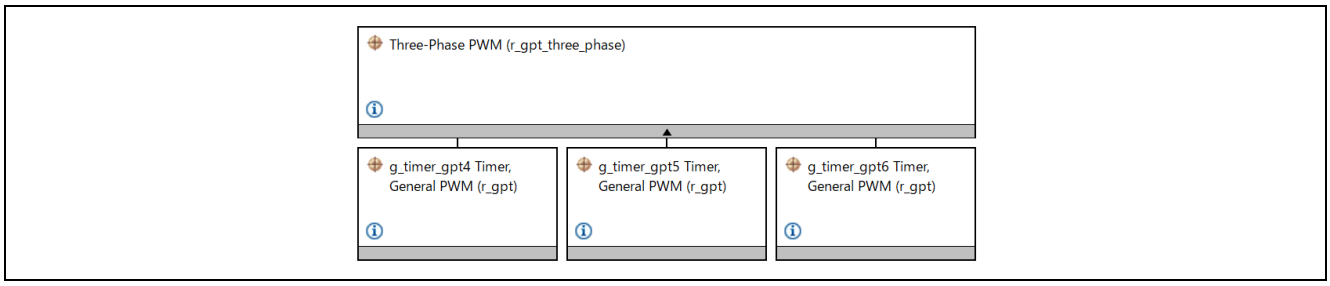


図 11-3　3 相 PWM GPT スタックの関係

表 11-10　Three-Phase PWM 設定

機能および設定項目			設定				
			RA6T2	**RA6T3**	**RA4T1**	**RA8T1**	**RA8T2**
General	Name		g_three_phase0				
	Mode	-	Triangle-Wave Symmetric PWM				
	Period	-	50				
	Period Unit	-	Microseconds				
	GPT U-Channel	-	4	1	1	5	8
	GPT V-Channel	-	5	2	2	2	7
	GPT W-Channel	-	6	3	3	3	9
	Callback Channel	-	U-Channel				
	Buffer Mode	-	Single Buffer				
	GTIOCA Stop Level	-	Pin Level Low				
	GTIOCB Stop Level	-	Pin Level High				
Extra Features	DeadTime	Dead Time Count Up (Raw Counts)	120	100	100	120	250
		Dead Time Count Down (Raw Counts)	120	100	100	120	250

表 11-11　U 相 GPT 設定

機能および設定項目				設定				
				RA6T2	RA6T3	RA4T1	RA8T1	RA8T2
Module <Name> Timer	General	Name		g_timer_gpt4	g_timer0			
	Extra Features	Output Disable	POEG Link	POEG Channel 3	POEG Channel 1	POEG Channel 1	POEG Channel 0	POEG Channel 0
			GTIOCA Disable setting	Set HiZ	Set HiZ	Set HiZ	Set HiZ	Set HiZ
			GTIOCB Disable Setting	Set HiZ	Set HiZ	Set HiZ	Set Hi,Z	Set HiZ
		ADC Trigger		Start Event Trigger • Request A during Down-Counting		—		
				ADC A Compare Match: 0		—		
		Interrupt Skipping	Interrupt to Count	None	None	Trough (Triangle)	None	None
			Interrupt Skip Count	0	0	1	0	0
Pins				GTIOC4A (PB04)	GTIOC1A (P409)	GTIOC1A (P409)	GTIOC5A (P115)	GTIOC8A (P605)
				GTIOC4B (PB05)	GTIOC1B (P408)	GTIOC1B (P408)	GTIOC5B (P609)	GTIOC8B (P604)

表 11-12　V 相 GPT 設定

機能および設定項目			設定				
			RA6T2	RA6T3	RA4T1	RA8T1	RA8T2
Module <Name> Timer	General	Name	g_timer_gpt5	g_timer1			
	その他の項目は、Three-Phase PWM 設定から自動設定されるため省略						
Pins			GTIOC5A (PB06)	GTIOC2A (P103)	GTIOC2A (P103)	GTIOC2A (P113)	GTIOC7A (P603)
			GTIOC5B (PB07)	GTIOC2B (P102)	GTIOC2B (P102)	GTIOC2B (P114)	GTIOC7B (P602)

表 11-13　W 相 GPT 設定

Function and Item for Setting			Setting				
			RA6T2	RA6T3	RA4T1	RA8T1	RA8T2
Module <Name> Timer	General	Name	g_timer_gpt6	g_timer2			
	その他の項目は、Three-Phase PWM 設定から自動設定されるため省略						
Pins			GTIOC6A (PB08)	GTIOC3A (P111)	GTIOC3A (P111)	GTIOC3A (P300)	GTIOC9A (P612)
			GTIOC6B (PB09)	GTIOC3B (P112)	GTIOC3B (P112)	GTIOC3B (P112)	GTIOC9B (P613)

11.6 AGT0 設定(速度制御周期設定)

非同期汎用タイマ (asynchronous general purpose timer, AGT) は速度制御で割り込みのインターバルを設定します。以下に AGT の設定例を示します。

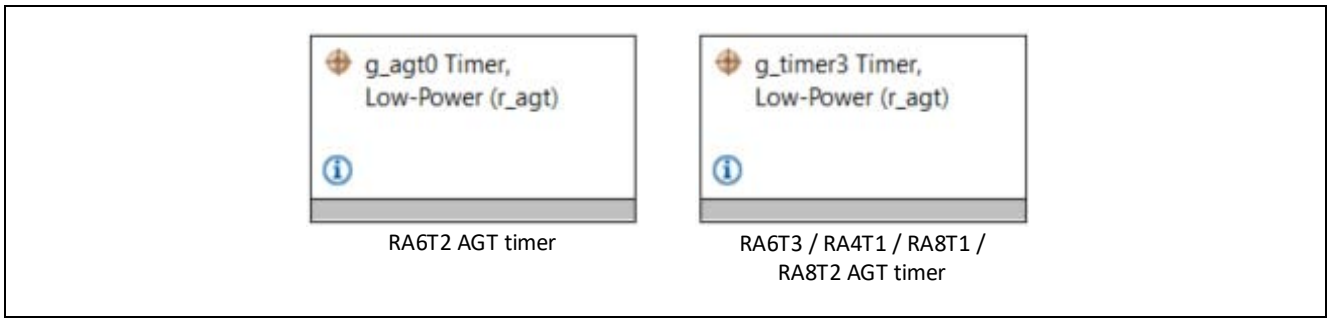


図 11-4　AGT0 のスタック　（RA ファミリ MCU）

表 11-14　AGT0(速度制御周期)の設定

機能および設定項目		設定				
		RA6T2	**RA6T3**	**RA4T1**	**RA8T1**	**RA8T2**
General	Name	g_agt0	g_timer3	g_timer3	g_timer3	g_timer3
	Counter Bit Width	AGT 32-bit	AGTW 32-bit	AGTW 32-bit	AGT 16-bit	AGT-16bit
	Channel	0				
	Mode	Periodic				
	Period	500	500	1	500	500
	Period Unit	Microseconds	Microseconds	Milliseconds	Microseconds	Microseconds
	Count Source	PCLKB				
Output	Duty Cycle Percent	50				
	AGTOA Output	Disabled				
	AGTOB Output	Disabled				
	AGTO Output	Disabled				
Input	Measurement Mode	Measure Disabled				
	Input Filter	No Filter				
	Enable Pin	Enable Pin Not Used				
	Trigger Edge	Trigger Edge Rising				
Interrupts	Callback	callback_agt_motor_speed_cyclic				
	Underflow Interrupt Priority	Priority 9				
Pins	AGTEED	<unavailable>				
	AGTIO0	<unavailable>				
	AGTO0	<unavailable>				
	AGTOA0	<unavailable>				
	AGTOB0	<unavailable>				

11.7 ADC 設定

MCU 内蔵の 12bit AD コンバータを用いて、U・V・W 相出力電流（3 シャント検出時）、ボード UI の可変抵抗器電圧、およびインバータ母線電圧を測定します。割り当てチャンネルと、検出タイミングを、表 11-15 に示します。

MCU の起動直後に行われる ADC の初期設定では、必ずキャリブレーション完了待ちの処理を行います。キャリブレーションが完了せずに、ADC のスキャンを開始すると ADC 検出値が不正な値となり、動作に支障をきたす場合があります。キャリブレーション完了には、おおよそ数 ms 程度の時間がかかります。

3 シャント電流検出方式ではモータ電流を検出するために GPT のキャリア用カウンタの谷の条件(ダウンカウント条件で 0 に到達でコンペアマッチし、トリガを発生)で電流を取得するように設定しています。また、AD 検出開始から変換終了までを行った後、AD 変換終了割り込みを発生させます。

表 11-15 ADC のチャンネルと検出タイミング設定（RA ファミリ MCU）

機能	割当チャンネル (ADC0 使用)					変換開始トリガ
	RA6T2	RA6T3	RA4T1	RA8T1	RA8T2	
インバータ母線電圧検出	7	4	4	8	7	ダウンカウントで 0 に到達時
U 相電流検出	4	0	0	0	6	
V 相電流検出	2	1	1	1	8	
W 相電流検出	0	2	2	2	10	
ボード UI 速度指令 VR 検出	16	5	5	7	15	

RA6T2 および RA8T2 は ADC0 に周辺機能 ADC_B を使用します。そのほかの RA ファミリ MCU (RA4T1、 RA6T3、RA8T1) は ADC12 を使用します。

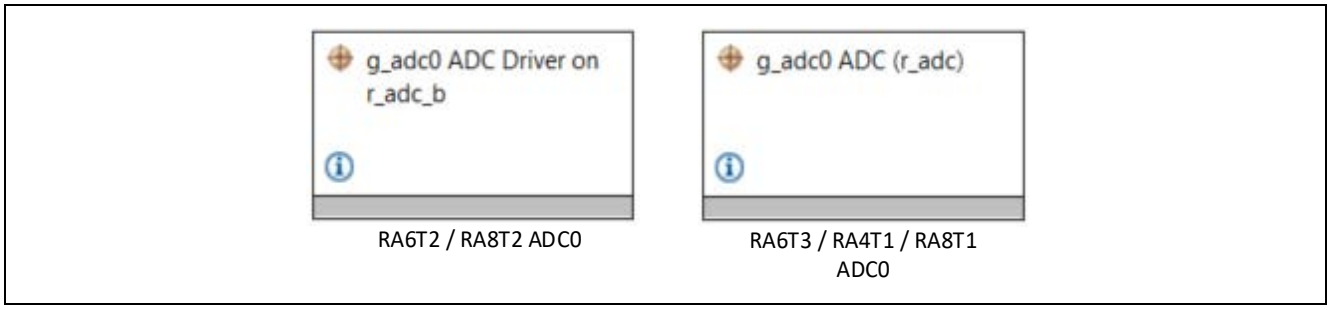


図 11-5　ADC のスタック

表 11-16　ADC の設定（RA6T2、RA8T2）

機能および設定項目			設定	
			RA6T2	RA8T2
General	Operation/ADC0	Conversion Method	SAR Mode	
		Scan Mode	Single Scan	
	Operation/ADC1	Conversion Method	SAR Mode	
		Scan Mode	Single Scan	
	ADC Successive Approximation Time	ADC0	6	5
		ADC1	6	5
	Synchronous Operation	Enable for ADC 0	Disable	
		Enable for ADC 1	Disable	
		Synchronous Operation	100	

		Period Cycle		
	Calibration / A/D Calibration	Sampling Time	10	
		Conversion Time	6	
	Calibration / Sample and Hold Calibration	Sampling Time	25	95
		Hold Time	3	5
	Sampling State Table	Entry 0	10	10
		Entry 1	4	95
		Entry 2	24	95
		Entry 3~15	95	
	Name		g_adc0	
Clock Configuration	Divider		Div /1	Div /3
	Source		PCLKC	PCLKA
Interrupts	Limiter Clip Priority		全て Disabled	
	Conversion Error Priority		全て Disabled	
	Overflow Priority		全て Disabled	
	Calibration End Priority		Priority 12	Priority 15
	Scan End Priority	Group 0	Priority 5	
		Group 1	Disabled	
		Group 2~8	Disabled	
	FIFO Priorities		全て Disabled	
	Callback		callback_gpt_adc_cyclic	
Digital Filter			未使用(デフォルト)	
Sample and Hold	Enable Unit	Unit 0	☑	☑
		Unit 1	☑	☑
		Unit 2	☑	☑
		Unit4	☐	☐
		Unit 5	☐	☐
		Unit 6	☐	☐
	Analog Channels 0-5	Sampling Time	60	95
		Hold Time	3	5
	Analog Channels 6-11	Sampling Time	95	
		Hold Time	5	
Programmable Gain Amplifier			未使用(デフォルト)	
User Offset Table			未使用(デフォルト)	
User Gain Table			未使用(デフォルト)	
Limiter Clipping			未使用(デフォルト)	
Virtual Channels	Virtual Channel 0	Scan Group	**Scan Group 0**	
		Channel Select	**AN000**	**ADC Channel 6**
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	

		Limit Clip Table ID	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
		Input Mode Selection	—	Single-ended input
		Data Sign Selection	—	Unsigned
	Virtual Channel 1	Scan Group	**Scan Group 0**	
		Channel Select	**AN002**	**ADC Channel 8**
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table ID	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
		Input Mode Selection	—	Single-ended input
		Data Sign Selection	—	Unsigned
	Virtual Channel 2	Scan Group	**Scan Group 0**	
		Channel Select	**AN004**	**ADC Channel 10**
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table ID	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
		Input Mode Selection	—	Single-ended input
		Data Sign Selection	—	Unsigned
	Virtual Channel 3	Scan Group	**Scan Group 1**	
		Channel Select	**AN007**	**ADC Channel 7**
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table Id	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
		Input Mode Selection	—	Single-ended input
		Data Sign Selection	—	Unsigned
	Virtual Channel 4	Scan Group	**Scan Group 0**	**Scan Group 1**
		Channel Select	**AN016**	**ADC Channel 15**
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	

		Add/Average Mode		Disabled	
		Add/Average Count		1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table ID		Disabled	
		Conversion Data Format Select		12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection		Disabled	
		Input Mode Selection		—	Single-ended input
		Data Sign Selection		—	Unsigned
	Virtual Channels 6 to 36			未使用	
Scan Groups	Scan Group 0	Self Diagnosis	Voltage Selection	Self-Diagnosis Mode Disabled	
		External Trigger Enable	External Trigger Input 0 (ADTRG0) Enable	☐	
		External Trigger Enable	External Trigger Input 1 (ADTRG1) Enable	☐	
		ELC Trigger Enable		未使用	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 0 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 1 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 2 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 3 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 4 Request A	☑	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 5 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 6 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 7 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 8 Request A	☐	☑
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 9 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable		未使用 • GPT Channel 0 to 9 Request B	未使用 • GPT Channel 9 to 13 Request A GPT Channel 0 to 13 Request B
		Enable		Enable	
		Converter Selection		ADC 0	ADC 1
		Start Trigger Delay		0	
		Scan End Interrupt Enable		Enable	
		Limit Clip Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Enable		Disable	
		FIFO Interrupt Enable		Disable	

		FIFO Interrupt Generation Level		0	
	Scan Group 1	Self Diagnosis	Voltage Selection	Self-Diagnosis Mode Disabled	
		External Trigger Enable	External Trigger Input 0 (ADTRG0) Enable	☐	
		External Trigger Enable	External Trigger Input 1 (ADTRG1) Enable	☐	
		ELC Trigger Enable		未使用	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 0 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 1 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 2 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 3 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 4 Request A	☑	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 5 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 6 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 7 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 8 Request A	☐	☑
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 9 Request A	☐	☐
		GPT Trigger Enable		未使用 • GPT Channel 0 to 9 Request B	未使用 • GPT Channel 9 to 13 Request A GPT Channel 0 to 13 Request B
		Enable		Enable	
		Converter Selection		**ADC 1**	
		Start Trigger Delay		0	
		Scan End Interrupt Enable		Disable	
		Limit Clip Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Enable		Disable	
		FIFO Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Interrupt Generation Level		0	
	Scan Group 2~8			未使用	

表 11-17 ADC の設定（RA6T3、RA4T1、RA8T1）

機能および設定項目			設定		
			RA6T3	**RA4T1**	**RA8T1**
General	Name		g_adc0		
	Unit		0		

	Resolution		12-bit		
	Alignment		Right		
	Clear after read		Off		
	Mode		Single Scan		
	Double-trigger		Disabled		
Input	Channel Scan Mask	Channel 0	☑	☑	☑
		Channel 1	☐	☐	☐
		Channel 2	☑	☑	☑
		Channel 3	☐	☐	☐
		Channel 4	☑	☑	☐
		Channel 5	☑	☑	☐
		Channel 6	☐	☐	☐
		Channel 7	☐	☐	☑
		Channel 8	☐	☐	☑
		Channel 9 to 28	未使用 (デフォルト)		
		Temperature Sensor	☐		
		Internal Reference Voltage	☐		
	Group B Scan Mask	Channel 0 to 28	未使用 (デフォルト)		
		Temperature Sensor	☐		
		Internal Reference Voltage	☐		
	Addition/ Averaging Mask	Channel 0 to 28	未使用 (デフォルト)		
		Temperature Sensor	☐		
		Internal Reference Voltage	☐		
	Sample and Hold	Sample and Hold Channels: Channel 0	☑		
		Sample and Hold Channels: Channel 1	☐		
		Sample and Hold Channels: Channel 2	☑		
		Sample Hold States	24		
	Window Compare	Window A	未使用 (デフォルト)		
		Window B	未使用 (デフォルト)		
		Window Mode	Disable		
		Event Output	OR		
		Add/Average Count	Disabled		
		Reference Voltage control	VREFH0/VREFH		
Interrupts	Normal/Group A Trigger		GPT1 COUNTER UNDERFLOW (Underflow)	GPT5 COUNTER UNDERFLOW (Underflow)	
	Group B Trigger		Disabled		
	Group Priority		Group A cannot interrupt Group B		
	Callback		callback_gpt_adc_cyclic		

	Scan End Interrupt Priority		Priority 5		
	Scan End Group B Interrupt Priority		Disabled		
	Window Compare A Interrupt Priority		Disabled		
	Window Compare B Interrupt Priority		Disabled		
Extra	ADC Ring Buffer		Disabled		
Pins	ADTRG0		<unavailable>	<unavailable>	—
	AN000		P000	P000	P004
	AN001		P001	P001	P005
	AN002		P002	P002	P006
	AN004		P004	P004	P007
	AN005		P005	P005	P010
	AN006		P006	P006	P009
	AN007		None	None	P014
	AN008		None	None	P008
	AN011		None	None	—
	AN012		None	None	—
	AN013		None	None	—
	AN016		P500	P500	P513
	AN017		—	—	P805
	AN018		—	—	P806
	AN019		—	—	P502
	PGAVSS000		None	None	—

11.8 POEG 設定

POEG は、モータ制御用インバータの回路で異常が発生した場合に、制御中の PWM ゲート信号を速やかに High-Z に切り替える MCU の機能です。POEG の FSP スタックで設定が可能な、POEG 設定を表 11-18 に示します。出力ピン設定は、インバータ仕様によって異なりますので、ご使用のインバータの信号仕様を確認ください。

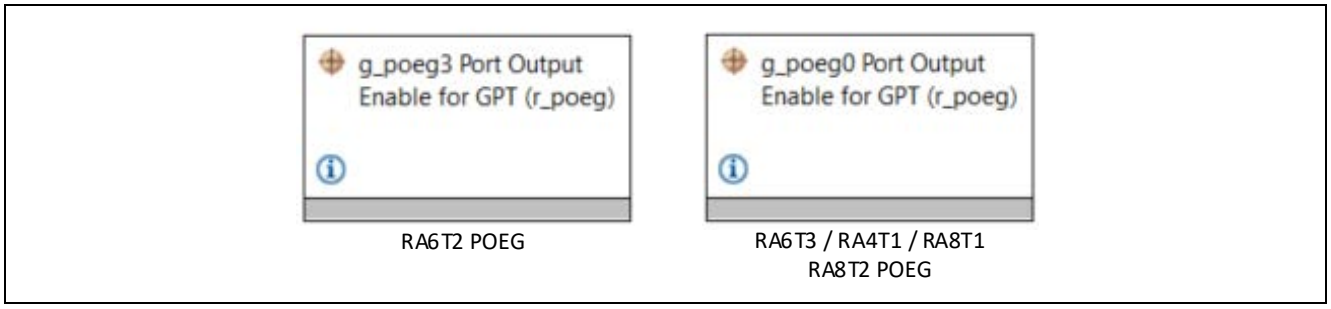


図 11-6　POEG のスタック

表 11-18　POEG 設定

機能および設定項目			設定				
			RA6T2	**RA6T3**	**RA4T1**	**RA8T1**	**RA8T2**
General	Trigger	GTETRG Pin	☑				
		GPT Output Level	☐				
		Oscillation Stop	☐				
		ACMPHS0	☐				
		ACMPHS1	☐				
		ACMPHS2	☐	☐	☐	—	☐
		ACMPHS3	☐	—	—	—	☐
		DSMIF0	—				☐
		DSMIF1					☐
	Name		g_poeg3	g_poeg0			
	Channel		3	1	1	0	0
Input	GTETRG Polarity		Active Low				
	GTETRG Noise Filter		PCLKB/32	PCLKB/32	PCLKB/32	PCLKB/128	PCLKB/32
Interrupts	Callback		callback_poe_overcurrent				
	Interrupt Priority		Priority 0(highest)				

11.9 ELC 設定

RA4T1、RA6T3、RA8T1 の ADC スキャン終了割り込み要求を、GPT カウンタのアンダーフローとリンクさせるために ELC を使用します。ELC は RA6T2 および RA8T2 では不要です。

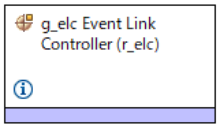


図 11-7　ELC のスタック

表 11-19　ELC 設定

機能および設定項目			設定
Module	Name		g_elc

表 11-20　ELC 設定（Event Links タブ）

Event Links Configuration / Allocations	
Peripheral Function	Event
ADC12A0	RA4T1 / RA6T3 : • GPT1 COUNTER UNDERFLOW (Underflow) RA8T1 : GPT5 COUNTER UNDERFLOW (Underflow)
その他	No allocation

11.10 IWDT 設定

IWDT は 14 ビットのダウンカウンタで、システム暴走時に MCU をリセットすることができます。API を使用するために IWDT のスタックは追加しますが、設定自体は BSP タブから行います。

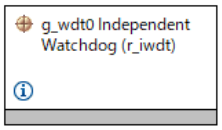


図 11-8　IWDT のスタック

表 11-21　IWDT 設定

機能および設定項目			設定
Module	Name		g_wdt0

表 11-22　IWDT 設定（BSP タブ)（RA6T2）

機能および設定項目			設定
RA6T2 Family	OFS0 register	Start Mode	IWDT is automatically activated after a reset (Autostart mode)
		Timeout Period	2048 cycles
		Dedicated Clock Frequency Divisor	1
		Window End Position	0% (no window end position)
		Window Start Position	100% (no window start position)
		Reset Interrupt Request Select	Reset is enabled

		Stop Control	Stop counting when in Sleep, Snooze mode, or Software Standby

表 11-23 IWDT 設定 （BSP タブ）（RA6T3、RA4T1、RA8T1、RA8T2）

機能および設定項目			設定
RA6T3 Family RA4T1 Family RA8T1 Family RA8T2 Device Options	OFS0 register	Start Mode	IWDT is stopped after a reset
		Timeout Period	2048 cycles
		Dedicated Clock Frequency Divisor	128
		Window End Position	0% (no window end position)
		Window Start Position	100% (no window start position)
		Reset Interrupt Request Select	Reset is enabled
		Stop Control	Stop counting when in Sleep, Snooze mode, or Software Standby

12. Smart Configurator 設定(RX26T 用)

12.1 SC の概要

RX26T 用のサンプルプログラムでは、HAL にスマート・コンフィグレータを使用してプロジェクトを作成しています。使用しているコンポーネントとユーザ領域に追加した関数を説明します。RA ファミリでは FSP を HAL に使用します。

RA ファミリ用と RX26T 用の差異は HAL および MCU が異なるのみであり、アプリケーション層は共通化されています。

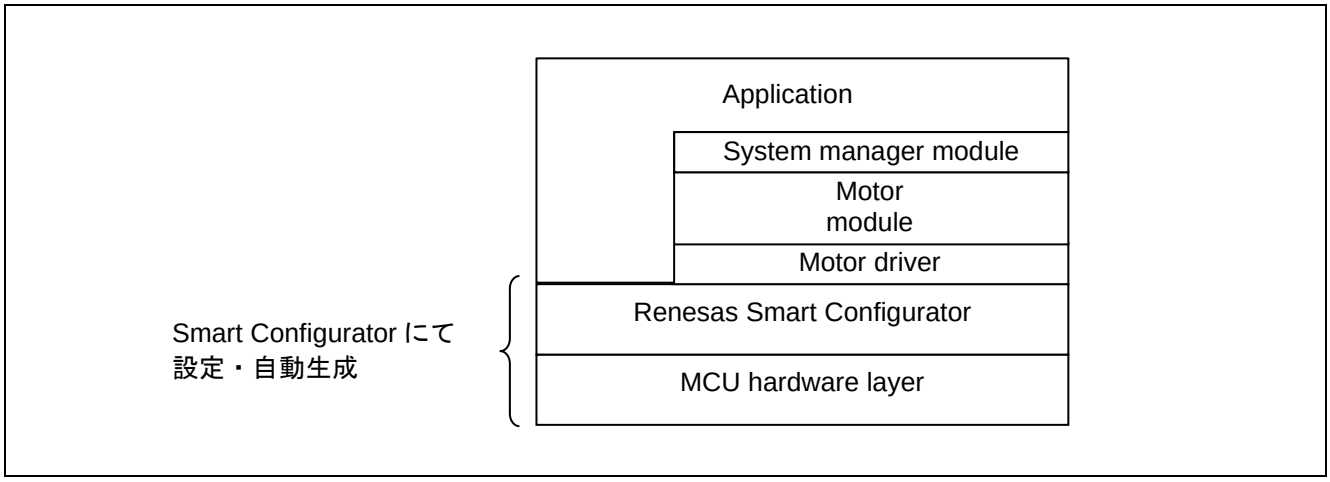


図 12-1　本サンプルプログラムのソフトウェアアーキテクチャ（RX26T）

12.2 クロック設定

SC のクロックタブで設定可能なクロック設定を表 12-1 に示します。

表 12-1　MCU クロック設定

クロックの種類	設定クロック
メインクロック	10MHz
システムクロック (ICLK)	120MHz
周辺モジュールクロック (PCLKA)	120MHz
周辺モジュールクロック (PCLKB)	60MHz
周辺モジュールクロック (PCLKC)	120MHz
周辺モジュールクロック (PCLKD)	60MHz
Flash IF クロック (FCLK)	60MHz
IWDTCLK	120kHz

12.3 コンポーネント設定

使用するコンポーネント情報と機能割り当てを表 12-2 に示します。

表 12-2　スマート・コンフィグレータのコンポーネントと機能割り当て

機能	コンポーネント
W 相 PWM 出力	Config_GPT0
V 相 PWM 出力	Config_GPT1
U 相 PWM 出力	Config_GPT2
A/D 変換処理 (相電流, インバータ母線電流)	Config_S12AD0
A/D 変換処理 (ボード UI の VR 速度指令電圧)	Config_S12AD2
使用ポートの設定	Config_PORT
速度制御割り込みタイマ	Config_CMT0
独立ウォッチドッグタイマ	Config_IWDT
インバータ HW 過電流検出	Config_POEG

12.4 AD 設定

MCU 内蔵の 12bit AD コンバータ(S12AD)を用いて、U 相出力電流と、W 相出力電流、インバータ母線電圧、リアクトル電流、AC 入力電圧とインバータ母線電流を測定します。割り当てチャンネルと、検出タイミングを、表 12-3 に示します。

表 12-3　AD のチャンネルと検出タイミング設定（RX26T）

機　能	チャンネル		変換開始トリガ
U 相電流検出 (3 シャント)	AN000		GPT0 の GTCNT と GTADTRA とのコンペアマッチ GTADTRA = 0 と設定することにより、キャリアの谷で AD 変換を開始する（20kHz）
V 相電流検出 (3 シャント)	AN001		
W 相電流検出 (3 シャント)	AN002		
インバータ母線電圧検出	AN003		
ボード UI 速度指令 VR 電圧検出	RX26T Type A	AN204	
	RX26T Type C	AN206	

12.5 CMT 設定

本サンプルプログラムでは、コンペアマッチタイマ(CMT)を使って、速度制御周期割り込みを発生させています。

表 12-4　コンペアマッチタイマの設定

コンポーネント	設定	設定内容
Config_CMT0	クロック設定	PCLK/8
	インターバル時間	500us
	コンペアマッチ割り込みを許可 (CMI0)	☑
	優先順位	レベル 6

12.6 GPT 設定

本サンプルプログラムでは、GPT を用いて PWM を出力します。

表 12-5　Motor 制御（GPT0, GPT1, GPT2）の設定

設定項目		設定値（3 シャント）
カウント設定	クロックソース	120 MHz
	タイマ動作周期	50 us
	周期レジスタ値	3000
	バッファ動作	シングルバッファ
	カウント方向	アップカウント
	カウンタ初期値	0
GTCCRA	GTCCRA 機能	コンペアマッチ
	バッファ動作	シングルバッファ

	GTIOC0A 機能	PWM 出力端子
	GTIOC0A 出力デューティ	コンペアマッチによって決定
	GTIOC0A 端子 ネゲート制御	Hi-Z
	開始/停止時の 出力レベル	開始時 0 出力 停止時 0 出力
	コンペアマッチ時の 出力レベル	トグル出力
	周期の終わりの 出力レベル	出力保持
GTCCRB	GTCCRB 機能	コンペアマッチ
	バッファ動作	シングルバッファ
	GTIOC0B 機能	PWM 出力端子
	GTIOC0B 出力デューティ	コンペアマッチによって決定
	GTIOC0B 端子 ネゲート制御	Hi-Z
	開始/停止時の 出力レベル	開始時 1 出力 停止時 1 出力
	コンペアマッチ時の 出力レベル	トグル出力
	周期の終わりの 出力レベル	出力保持
GTCCRC 機能		GTCCRA バッファレジスタ
GTCCRD 機能		コンペアマッチ
GTCCRE 機能		GTCCRB バッファレジスタ
GTCCRF 機能		コンペアマッチ
ソフトウェア要因カウントスタート		☑
ソフトウェア要因カウントストップ		☑
デッドタイム 自動設定	自動設定	☑
	GTDVU 値	120
	GTDVD = GTDVU	☑
A/D 変換開始 要求設定	GTADTRA （GPT0 のみ）	アップカウント中
	GTADTRA コンペアマッチ値 （GPT0 のみ）	1
	GTATDRB	-
	GTADTRB コンペアマッチ値	-
出力停止グループ	グループ選択	B

12.7 POEG 設定

Config_POEG で設定が可能な、POEG 設定を表 12-6 に示します。出力ピン設定は、インバータ仕様によって異なりますので、ご使用のインバータの信号仕様を確認ください。

表 12-6　POEG 設定（RX26T）

機　能		設定
GTETRGB 設定	入力反転	☑
	ノイズフィルタ	☑ PCLK_GPTB クロックごとにサンプリング サンプリング回数：3 回
	検出モード	エッジ検出
	GTETRGB 端子からの 出力停止要求	☑
割り込み設定	POEGGBI 割り込みを許可	レベル 15

12.8 IWDT 設定

Config_IWDT で設定が可能な、IWDT 設定を表 12-7 に示します。

表 12-7　IWDT 設定（RX26T）

機　能		設定
スタートモード設定	-	レジスタスタートモード
IWDTCLK クロック設定	クロック分周比選択	IWDTCLK
	周波数	120 kHz
	タイムアウトサイクル	1024 サイクル
	タイムアウト期間	8.533333 ms
ウィンドウ位置設定	開始位置	100 %
	終了位置	0 %
スリープモードカウント停止 制御設定	-	許可
リセット割り込み要求設定	-	リセット出力

12.9 割り込み設定

モータコンポーネントを使用した MCU の割り込み情報を表 12-8 に示します。

表 12-8　割り込み一覧（RX26T）

コンポーネント	割り込み関数	説明
Config_POEG	r_Config_POEG_poeggbi_interrupt	インバータ HW 過電流割り込み 割り込みレベル：15
Config_S12AD	r_Config_S12AD0_interrupt	モータ AD 変換終了割り込み 割り込みレベル：10
Config_CMT0	r_Config_CMT0_cmi0_interrupt	速度制御割り込み 割り込みレベル：6

12.10 端子設定

端子のインタフェース情報を表 12-9,に示します。

表 12-9　端子インタフェース（RX26T）

機　能	端子名		周辺機能	機能割付	備考
LED1	RX26T-A	P21	PORT	—	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
	RX26T-C	P65			
LED2	RX26T-A	P20	PORT	—	
	RX26T-C	PB5			
SW1	RX26T-A	P23	PORT	—	ボード UI モータ回転開始・停止スイッチ
	RX26T-C	P21			
SW2	RX26T-A	P22	PORT	—	リセットスイッチ
	RX26T-C	P20			
U 相電流検出	P40		S12AD0	AN000	-
V 相電流検出	P41		S12AD0	AN001	-
W 相電流検出	P42		S12AD0	AN002	-
インバータ母線電圧検出	P43		S12AD0	AN003	-
ボリュームスイッチ	RX26T-A	P50	S12AD2	AN204	ボード UI 速度指令
	RX26T-C	P47		AN206	
インバータ HW 過電流検出	RX26T-A	P70	POEG	GTETRGB	立下りエッジで異常
	RX26T-C	P96			
PWM 出力（U_p）	RX26T-A	P73	GPT2	GTIOC2A	Active High
	RX26T-C	P71	GPT0	GTIOC0A	
PWM 出力（U_n）	RX26T-A	P76	GPT2	GTIOC2B	Active High
	RX26T-C	P74	GPT0	GTIOC0B	
PWM 出力（V_p）	P72		GPT1	GTIOC1A	Active High
PWM 出力（Vn）	P75		GPT1	GTIOC1B	Active High
PWM 出力（W_p）	RX26T-A	P71	GPT0	GTIOC0A	Active High
	RX26T-C	P73	GPT2	GTIOC2A	
PWM 出力（W_n）	RX26T-A	P74	GPT0	GTIOC0B	Active High
	RX26T-C	P76	GPT2	GTIOC2B	

13. 評価結果

13.1 モータ制御評価

13.1.1 始動から閉ループ速度制御への移行

誘起電圧オブザーバによる磁極位置の推定を行うセンサレスベクトル制御では、正常な推定が可能になる十分な大きさの誘起電圧を発生させる速度域まで速度を加速させる必要があります。そのため、d 軸とモータの U 相の軸合わせを行った後、オープンループ制御で設定速度まで加速を行います。設定速度に到達後は、閉ループ速度制御（PI 制御）に移行し、高トルク・高効率な駆動が可能になります。図 13-1 はオープンループ制御によって 600r/min まで加速を行い、誘起電圧オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御に移行する様子を示しています。

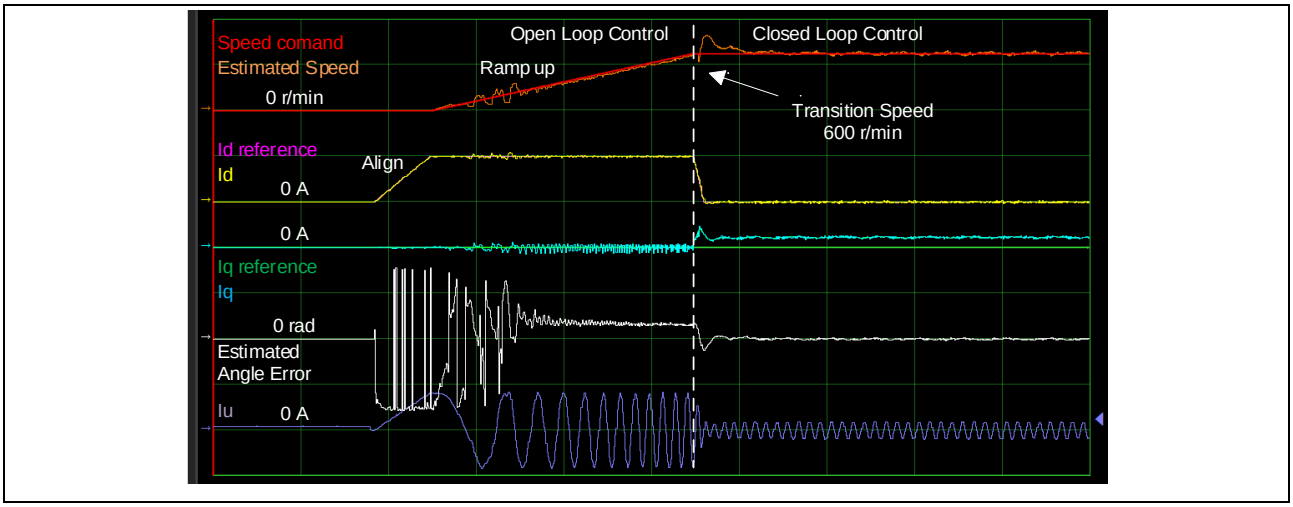


図 13-1　始動から閉ループ速度制御へ移行時の波形

13.1.2 負荷特性

2000r/min 運転時の負荷特性波形を以下に示します。なお、600r/min から 2000r/min まで、負荷試験を行い、定格負荷で運転できることを確認しています。

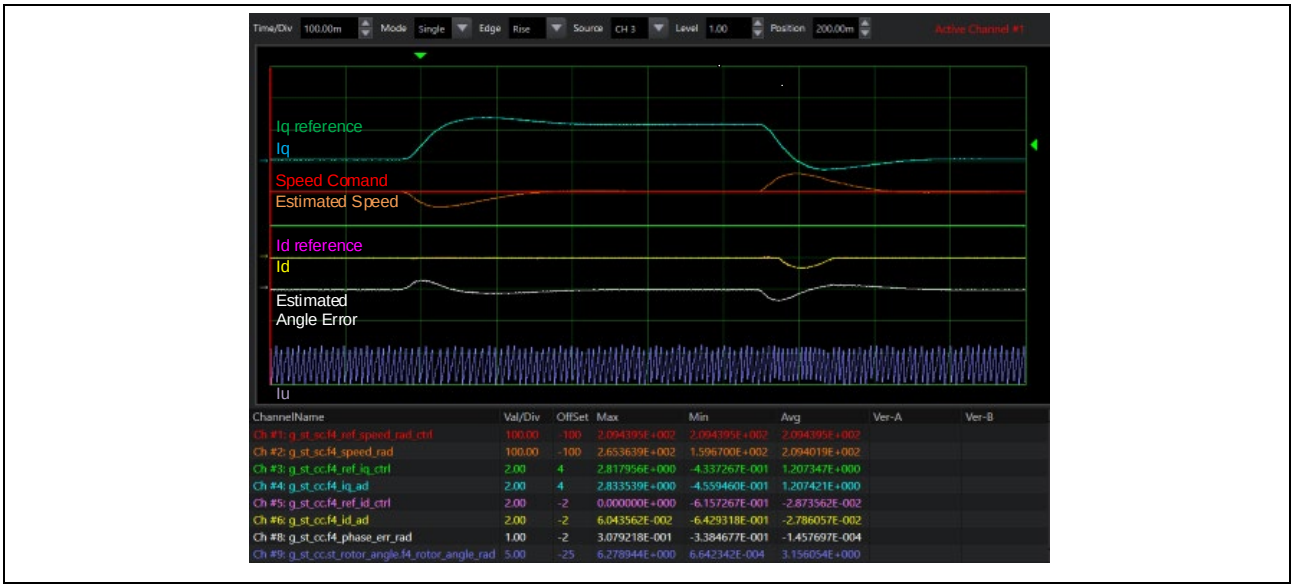


図 13-2　負荷特性(2000r/min 時)

13.1.3 フライングスタート

フライングスタート（フリーラン再起動）は、インバータが OFF でモータが回転している状態からセンサレスベクトル制御（閉ループ速度制御）を開始する機能です。モータの磁極位置と速度が不明の状態で、センサレスベクトル制御を始動しようとすると、過電流などの予期せぬ動作が発生し、始動に失敗する可能性があります。そのため、通常はモータをブレーキ等で停止させてからオープンループ制御を行い、センサレスベクトル制御に移行して所望の速度でモータを駆動していました。一方で、フライングスタートは回転しているモータの磁極位置と速度を推定することで、センサレスベクトル制御を直接開始させることができ、始動時間の大幅な短縮を可能にします。図 13-3 には、フリーラン減速時の「アクティブブレーキによる再起動」と「フライングスタートによる再起動」を示しています。

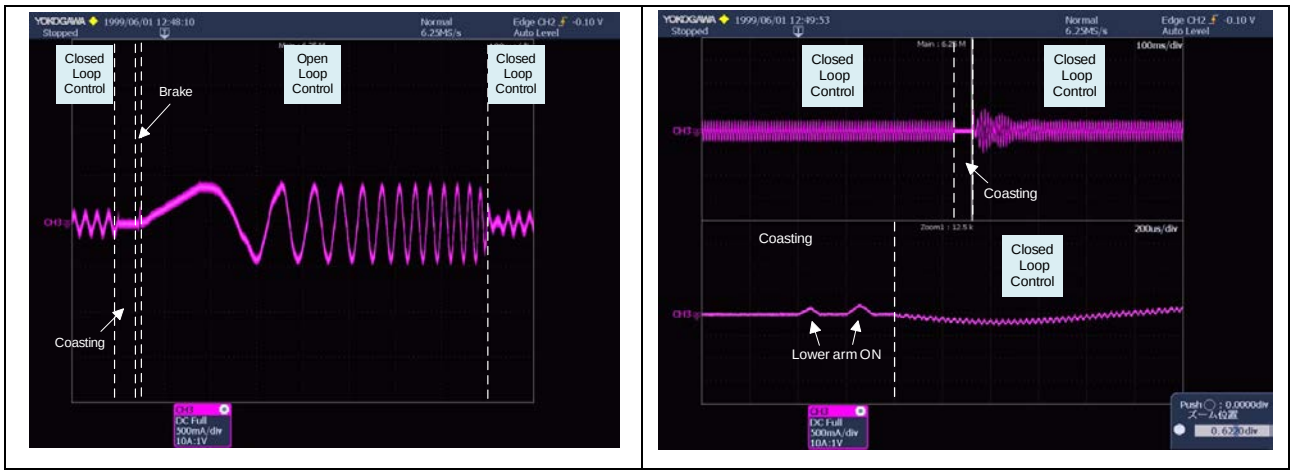


図 13-3　フライングスタート動作時の電流波形
(左: アクティブブレーキ, 右:フライングスタート)

13.2 CPU 使用率

各制御周期の CPU 処理時間と負荷率を以下に示します。

表 13-1　制御ループと CPU 負荷率 (RA ファミリ MCU)

対象デバイス	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
RA6T2	モータ制御・電流制御ループ	50 µs (間引き 0 回)	17.7 µs	35.4 %
	モータ制御・速度制御ループ	500 µs	4.6 µs	0.9 %
RA6T3	モータ制御・電流制御ループ	50 µs (間引き 0 回)	27.4 µs	54.8 %
	モータ制御・速度制御ループ	500 µs	6.5 µs	1.3 %
RA4T1	モータ制御・電流制御ループ	100 µs (間引き 1 回))	48.0 µs	48.0 %
	モータ制御・速度制御ループ	1 ms	12.0 µs	1.2 %
RA8T1	モータ制御・電流制御ループ	50 µs (間引き 0 回)	15.3 µs	30.6 %
	モータ制御・速度制御ループ	500 µs	4.0 µs	0.8 %
RA8T2	モータ制御・電流制御ループ	50 µs (間引き 0 回)	2.7 µs	5.4 %
	モータ制御・速度制御ループ	500 µs	0.8 µs	0.2 %

表 13-2　制御ループと CPU 負荷率 (RX26T)

対象デバイス	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
RX26T-A	モータ制御・電流制御ループ	50 µs (間引き 0 回)	13.6 µs	27.2 %
	モータ制御・速度制御ループ	500 µs	6.0 µs	1.2 %
RX26T-C	モータ制御・電流制御ループ	50 µs (間引き 0 回)	13.7 µs	27.4 %
	モータ制御・速度制御ループ	500 µs	5.9 µs	1.2 %

13.3 プログラムサイズ・RAM 使用量

本サンプルプログラムでのプログラムサイズ(ROM)と、RAM 使用量は以下の通りです。コンパイラの最適化設定において、最適化レベル 2 (-O2)に設定しています。

表 13-3 プログラムサイズと RAM 使用量 (RA ファミリ MCU)

対象デバイス	メモリ	サイズ
RA6T2	プログラムサイズ(ROM)	38328 [Bytes]
	RAM 使用量	6440 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	488 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
RA6T3	プログラムサイズ(ROM)	37768 [Bytes]
	RAM 使用量	6436 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	484 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
RA4T1	プログラムサイズ(ROM)	37708 [Bytes]
	RAM 使用量	6436 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	484 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
RA8T1	プログラムサイズ(ROM)	37516 [Bytes]
	RAM 使用量	6484 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	572 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
RA8T2	プログラムサイズ(ROM)	40504 bytes
	RAM 使用量	6512 bytes
	スタック解析結果の最大値	572 bytes
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 bytes

表 13-4 プログラムサイズと RAM 使用量 (RX26T)

対象デバイス	メモリ	サイズ
RX26T-A	プログラムサイズ(ROM)	31031 [Bytes]
	RAM 使用量	13053 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]
RX26T-C	プログラムサイズ(ROM)	31010 [Bytes]
	RAM 使用量	13053 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]

14. FAQ

代表的な現象と、その解決例を表 14-1 に示します。

表 14-1　現象と解決例の一覧

現象	解決例
FSP のバージョンが異なるというエラーが出ました。	本サンプルプログラムで指定された e² studio と FSP のバージョンが異なる環境で、プロジェクトを開いた場合、FSP のバージョンが異なる旨の表示のエラーが表示されます。弊社ウェブサイトから、本サンプルプログラムで指定したバージョンの FSP 環境をご利用 PC に導入ください。 FSP のバージョンが異なる場合、API 等の仕様が変更されている場合があり、ユーザの修正が必要となる場合があります。また、実行結果や挙動が変わる可能性があります。FSP のバージョンが異なる環境で動かした場合、サポートが行えませんのでご注意ください。
フライングスタート機能を動作させたとき、モータが一旦、停止してしまいます。	フライングスタート機能では、誘起電圧が低く、正常に速度・角度が推定できない設定速度未満と判定した場合にはアクティブブレーキ機能によってモータを強制停止させます。設定速度を見直してください。
フライングスタート機能を動作させたとき、過電流エラーが生じます。	フライングスタートの電流閾値を適切に設計・設定してください。モータ定数や配線のインピーダンスの影響も受けます。
脱調検出が行われません。	脱調検出機能は、過電流保護機能の補完的な機能であり、先に過電流エラーとなる場合があります。また、脱調時に電流に振動成分が生じない場合には検出ができません。過電流エラーの閾値を適切に設計して併用を検討ください。
運転を開始してもモータを始動できません。	制御しているモータに対して、負荷が大きい場合・イナーシャが大きい場合は、オープンループでの始動に失敗する場合があります。オープンループ時の d 軸電流指令値および速度増減幅を見直してください。詳細は 10.13(1)を参照してください。
起動直後に ADC で検出した値がずれている。	RA6T2 に搭載されている周辺機能 ADC_B は、起動時やリセット時等に自己校正を行う必要があります。このため、起動時の ADC の初期設定で、キャリブレーション完了待ちの処理を省略した場合、ADC で検出した値が不正となる場合があります。起動時の処理で、ADC のキャリブレーション完了待ちの処理を必ず実装してください。
トルク振動抑制機能で振動抑制効果が得られません。	振動は、モータやコンプレッサだけでなく、周辺の機械部品やその接合部分、防振部品などの特性・構造・組み合わせによって発生します。トルク振動抑制の効果は、モータの回転速度と、それらの機構部品との関係性によって、効果の有無が大きく変化します。構造や部品の選定、使用する回転速度を見直すなどして、最適解となる条件を実験等によって導き出す必要があります。
センサレスベクトル制御に切り替えできません。	SPM モータを使用している場合に MTPA 機能を有効にすると、正常にモータ制御ソフトウェアが動作しません。MTPA 機能は IPM モータのみで有効ですので、SPM モータ使用時は必ず無効としてください。

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2026/1/15	-	新規発行
1.10	2026/6/30	-	・RA6T3, RA4T1, RX26T Type C を追加 ・開発環境の更新 ・モータパラメータの変更

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. 静電気対策
   CMOS 製品の取り扱いの際は静電気防止を心がけてください。CMOS 製品は強い静電気によってゲート絶縁破壊を生じることがあります。運搬や保存の際には、当社が出荷梱包に使用している導電性のトレーやマガジンケース、導電性の緩衝材、金属ケースなどを利用し、組み立て工程にはアースを施してください。プラスチック板上に放置したり、端子を触ったりしないでください。また、CMOS 製品を実装したボードについても同様の扱いをしてください。
2. 電源投入時の処置
   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. 電源オフ時における入力信号
   当該製品の電源がオフ状態のときに、入力信号や入出力プルアップ電源を入れないでください。入力信号や入出力プルアップ電源からの電流注入により、誤動作を引き起こしたり、異常電流が流れ内部素子を劣化させたりする場合があります。資料中に「電源オフ時における入力信号」についての記載のある製品は、その内容を守ってください。
4. 未使用端子の処理
   未使用端子は、「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。
5. クロックについて
   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。
6. 入力端子の印加波形
   入力ノイズや反射波による波形歪みは誤動作の原因になりますので注意してください。CMOS 製品の入力がノイズなどに起因して、V_{IL}（Max.）から V_{IH}（Min.）までの領域にとどまるような場合は、誤動作を引き起こす恐れがあります。入力レベルが固定の場合はもちろん、V_{IL}（Max.）から V_{IH}（Min.）までの領域を通過する遷移期間中にチャタリングノイズなどが入らないように使用してください。
7. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止
   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、将来の拡張機能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。
8. 製品間の相違について
   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、フラッシュメモリ、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、ノイズ幅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

1. 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。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、お客様の責任において、お客様の機器・システムを設計ください。これらの使用に起因して生じた損害（お客様または第三者いずれに生じた損害も含みます。以下同じです。）に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 当社製品または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またはこれらに関する紛争について、当社は、何らの保証を行うものではなく、また責任を負うものではありません。
3. 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。
4. 当社製品を組み込んだ製品の輸出入、製造、販売、利用、配布その他の行為を行います。にあたり、第三者保有の技術の利用に関するライセンスが必要となる場合、当該ライセンス取得の判断および取得はお客様の責任において行ってください。
5. 当社製品を、全部または一部を問わず、改造、改変、複製、リバースエンジニアリング、その他、不適切に使用しないでください。かかる改造、改変、複製、リバースエンジニアリング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。
6. 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）、交通制御（信号）、大規模通信機器、金融端末基幹システム、各種安全制御装置等

   当社製品は、データシート等により高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、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（宇宙機器と、海底中継器、原子力制御システム、航空機制御システム、プラント基幹システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、これらの用途に使用することは想定していません。たとえ、当社が想定していない用途に当社製品を使用したことにより損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。
7. あらゆる半導体製品は、外部攻撃からの安全性を 100%保証されているわけではありません。当社ハードウェア／ソフトウェア製品にはセキュリティ対策が組み込まれているものもありますが、これによって、当社は、セキュリティ脆弱性または侵害（当社製品または当社製品が使用されているシステムに対する不正アクセス・不正使用を含みますが、これに限りません。）から生じる責任を負うものではありません。当社は、当社製品または当社製品が使用されたあらゆるシステムが、不正な改変、攻撃、ウイルス、干渉、ハッキング、データの破壊または窃盗その他の不正な侵入行為（「脆弱性問題」といいます。）によって影響を受けないことを保証しません。当社は、脆弱性問題に起因しまたはこれに関連して生じた損害について、一切責任を負いません。また、法令において認められる限りにおいて、本資料および当社ハードウェア／ソフトウェア製品について、商品性および特定目的との合致に関する保証ならびに第三者の権利を侵害しないことの保証を含め、明示または黙示のいかなる保証も行いません。
8. 当社製品をご使用の際は、最新の製品情報（データシート、ユーザーズマニュアル、アプリケーションノート、信頼性ハンドブックに記載の「半導体デバイスの使用上の一般的な注意事項」等）をご確認の上、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他指定条件の範囲内でご使用ください。指定条件の範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障、誤動作の不具合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。
9. 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、データシート等において高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、耐放射線設計を行っておりません。仮に当社製品の故障または誤動作が生じた場合であっても、人身事故、火災事故その他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。
10. 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合せください。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。かかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は、一切その責任を負いません。
11. 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。当社製品および技術を輸出、販売または移転等する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他日本国および適用される外国の輸出管理関連法規を遵守し、それらの定めるところに従い必要な手続きを行ってください。
12. お客様が当社製品を第三者に転売等される場合には、事前に当該第三者に対して、本ご注意書き記載の諸条件を通知する責任を負うものといたします。
13. 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。
14. 本資料に記載されている内容または当社製品についてご不明な点がございましたら、当社の営業担当者までお問合せください。

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が直接的、間接的に支配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。

(Rev.5.0-1　2020.10)

本社所在地

〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-2-24（豊洲フォレシア）

www.renesas.com

お問合せ窓口

弊社の製品や技術、ドキュメントの最新情報、最寄の営業お問合せ窓口に関する情報などは、弊社ウェブサイトをご覧ください。

www.renesas.com/contact/

商標について

ルネサスおよびルネサスロゴはルネサス エレクトロニクス株式会社の商標です。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。

© 2026 Renesas Electronics Corporation. All rights reserved.