

RA Family

永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 - 2 モータ駆動

Evaluation System for BLDC Motor シリーズ用

要旨

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について説明することを目的としています。

本アプリケーションノート対象ソフトウェアはあくまで参考用途であり、弊社がこの動作を保証するものではありません。本アプリケーションノート対象ソフトウェアを使用する場合、適切な環境で十分な評価をしたうえで御使用ください。

動作確認デバイス

サンプルソフトウェアの動作確認は下記のデバイスで行っております。

- RA6T1 (R7FA6T1AD3CFP)

目次

1. 概説	3
2. 開発環境	3
2.1 動作確認環境	3
2.2 ハードウェア構成	4
2.2.1 ハードウェア構成図	4
2.2.2 ハードウェア改造内容	7
2.2.2.1 2モータ用拡張ボードを使用しない場合	7
2.2.2.2 2モータ用拡張ボードを使用する場合	11
2.2.3 ボードユーザインタフェース	14
2.2.4 周辺機能	16
2.3 ソフトウェア構成	21
2.3.1 ソフトウェア・ファイル構成	21
2.3.2 モジュール構成	23
2.4 ソフトウェアスペック	24
2.5 割込み優先順位	25
3. 制御ソフトウェア説明	26
3.1 制御内容	26
3.1.1 モータ起動/停止	26
3.1.2 A/D 変換	26
3.1.3 変調	27
3.1.3.1 正弦波変調	27
3.1.3.2 空間ベクトル変調	27
3.1.4 状態遷移	28
3.1.5 始動方法	29

3.1.6	保護機能	30
3.1.7	キャリア同期割り込み	31
3.2	センサレスベクトル制御ソフトウェア関数仕様.....	32
3.3	関数一覧表.....	33
3.4	Contents of control	41
3.4.1	Configuration Options.....	41
3.4.2	Configuration Options for included modules	41
3.5	制御フロー（フローチャート）	49
3.5.1	メイン処理.....	49
3.5.2	電流制御周期割り込み（キャリア同期割り込み）処理.....	50
3.5.3	速度制御周期割り込み処理	51
3.5.4	過電流検出割り込み処理	52
4.	サンプルソフトウェアの操作概要	53
4.1	クイックスタート	53
4.2	モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」	54
4.2.1	概要	54
4.2.2	Analyzer 機能用変数一覧	55
4.2.3	Analyzer 機能操作例.....	56
4.2.4	通信速度の変更例	59
5.	参考ドキュメント	60

1. 概説

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)を使用し、2個の永久磁石同期モータを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について説明することを目的としています。サンプルプログラムはモータ制御用のキット(Evaluation System for BLDC Motor シリーズ)と組み合わせることで、モータ制御を行うことができます。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。

以降、2つのモータをそれぞれモータ 1、モータ 2 と称します。

2. 開発環境

2.1 動作確認環境

本アプリケーションノート対象ソフトウェアを表 2-1、表 2-2 に示します。

表 2-1 ハードウェア開発環境

分類	使用製品
マイコン/CPU カード型名	RA6T1 (R7FA6T1AD3CFP) / RTK0EMA170C00000BJ
インバータボード型名	48V 系インバータボード / RTK0EM0000B10020BJ (2 セット)
モータ	TG-55L-KA (ツカサ電工株式会社製) (2 個)

表 2-2 ソフトウェア開発環境

e ² studio バージョン	FSP バージョン	ツールチェーン バージョン
V2023-07	V4.6.0	GCC ARM Embedded: V10.3.1.20210824

ご購入、技術サポートにつきましては、弊社営業及び特約店にお問い合わせください。

2.2 ハードウェア構成

本システムの概要を以下に説明します。

本 APN では、2つのハードウェア構成を説明しています。

- ① 2モータ用拡張ボードを使用しない場合 :
CPU カードとインバータボードの改造が必要であり、また、ご自身でケーブルを作成する必要があります。
- ② 2モータ用拡張ボードを使用する場合 :
CPU カードの改造が必要であり、また、ケーブルは市販の物を準備する必要があります。

2.2.1 ハードウェア構成図

(1) 全体構成

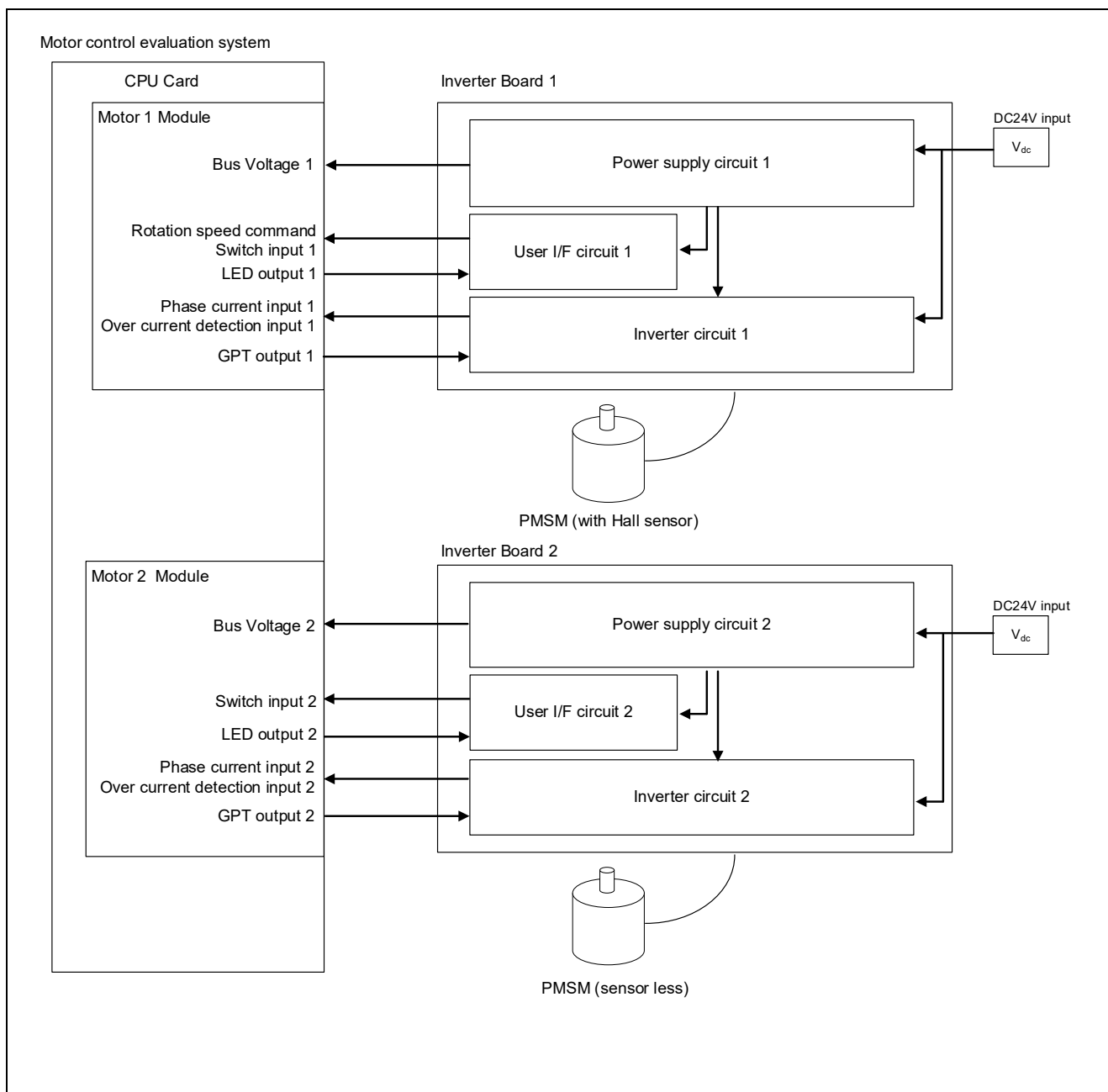


図 2-1 ハードウェア構成図

(2) モータ 1 モジュール構成

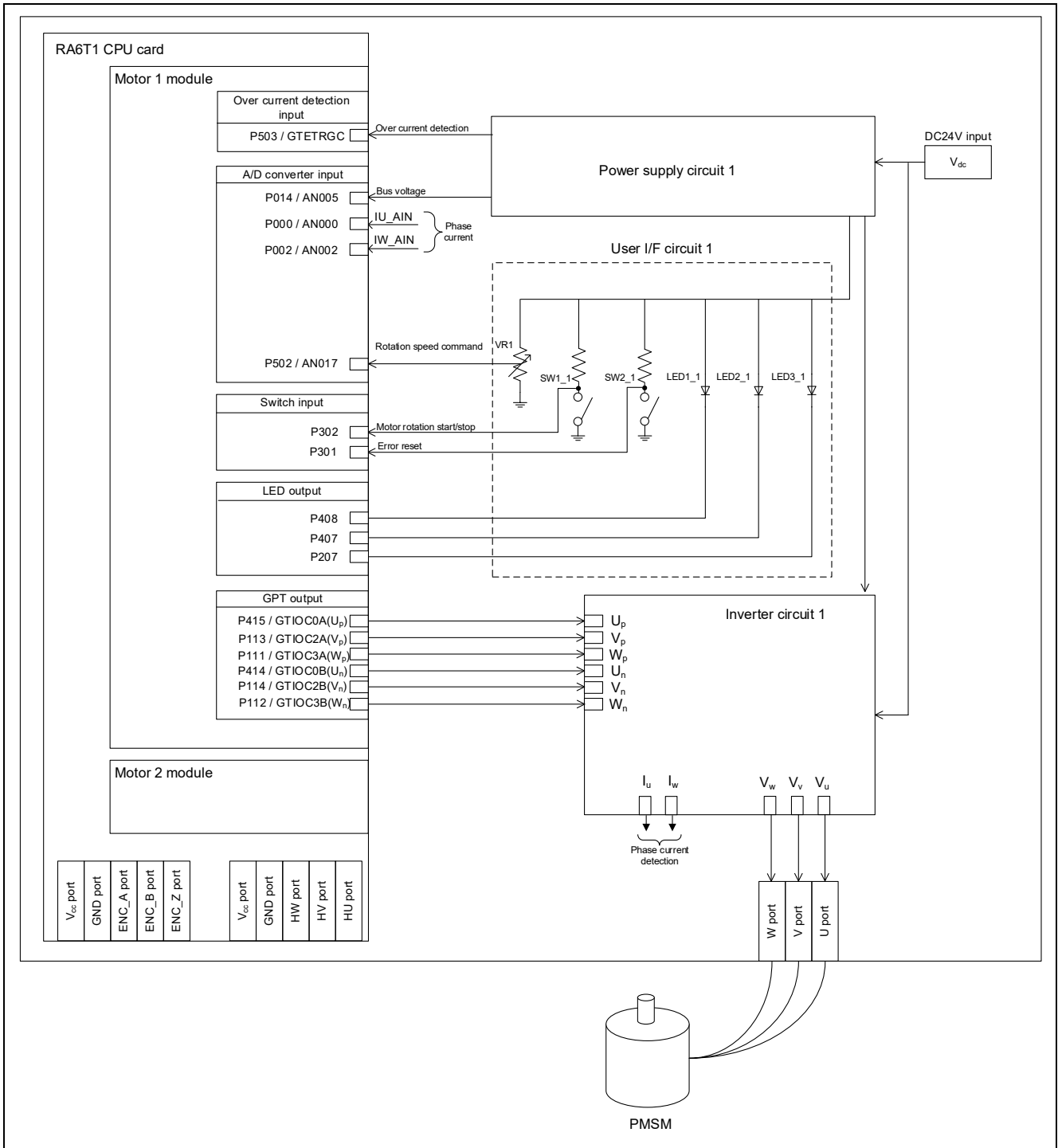


図 2-2 ハードウェア構成図 (モータ 1 モジュール)

(3) モータ 2 モジュール構成

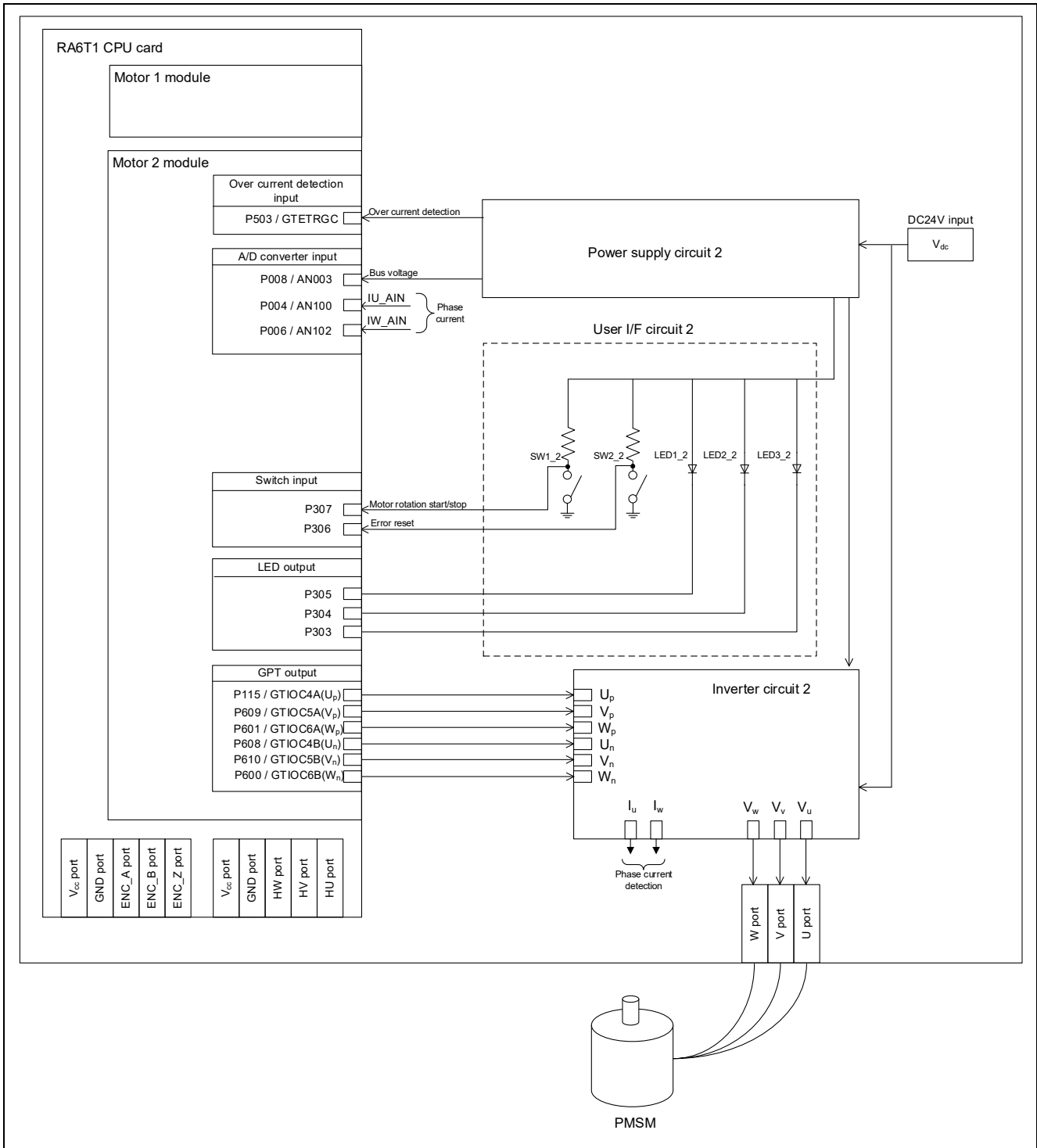


図 2-3 ハードウェア構成図 (モータ 2 モジュール)

2.2.2 ハードウェア改造内容

本システムを使用するためには、ハードウェアの改造が必要になります。ここでは、先述の（①2モータ用拡張ボードを使用しない場合、②2モータ用拡張ボードを使用する場合）それぞれの改造方法を紹介しません。なお、本章で紹介している部品はあくまで一例です。使用する部品については、必ずご自身でご確認ください。

2.2.2.1 2モータ用拡張ボードを使用しない場合

- ① インバータボードの”CNE”にピンヘッダを実装します。

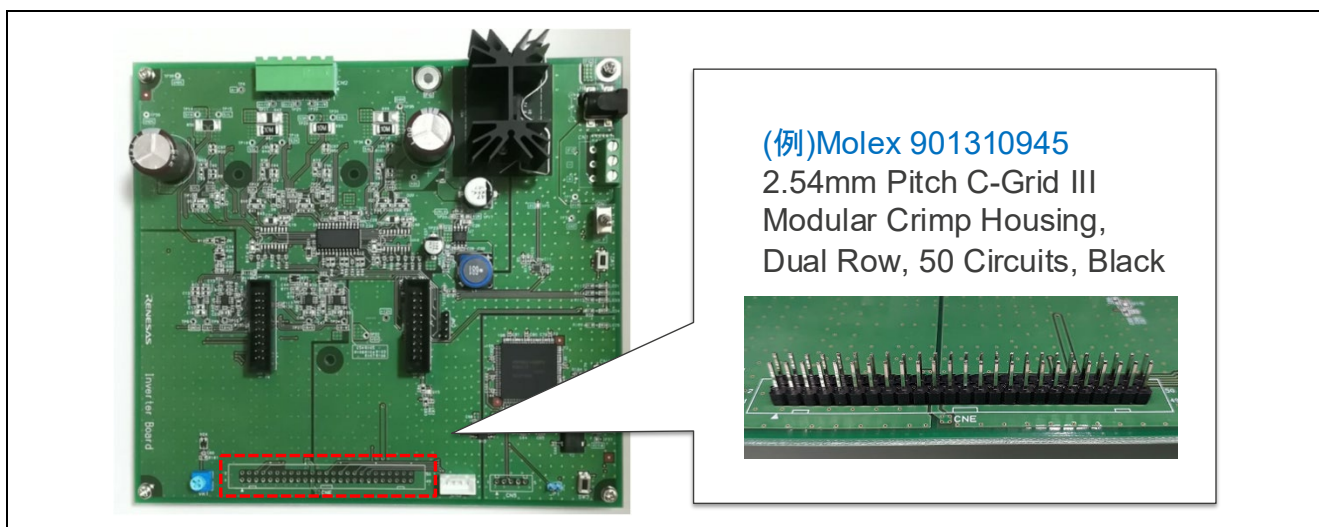


図 2-4 インバータボード 2 へのピンヘッダ実装

- ② インバータボード 2 の、R140, R142, R144, R145, R146, R147, R148, R149, R150, R152, R153, R154, R155, R156 に 0Ω 抵抗(サイズ : 0603(mm))を実装します。

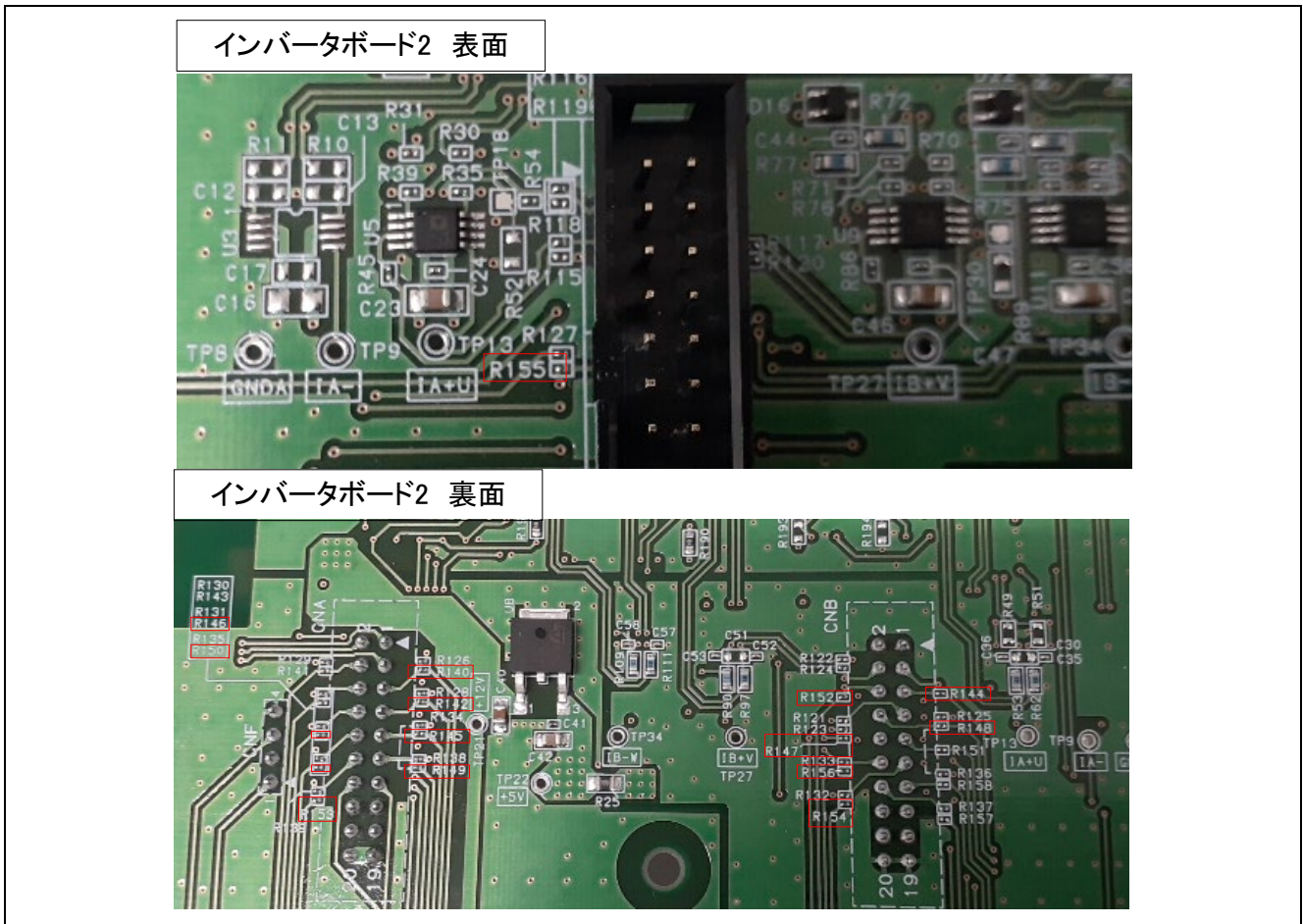


図 2-5 インバータボード 2 抵抗実装

- ③ CPU カードの"CNC"にピンヘッダを実装します。

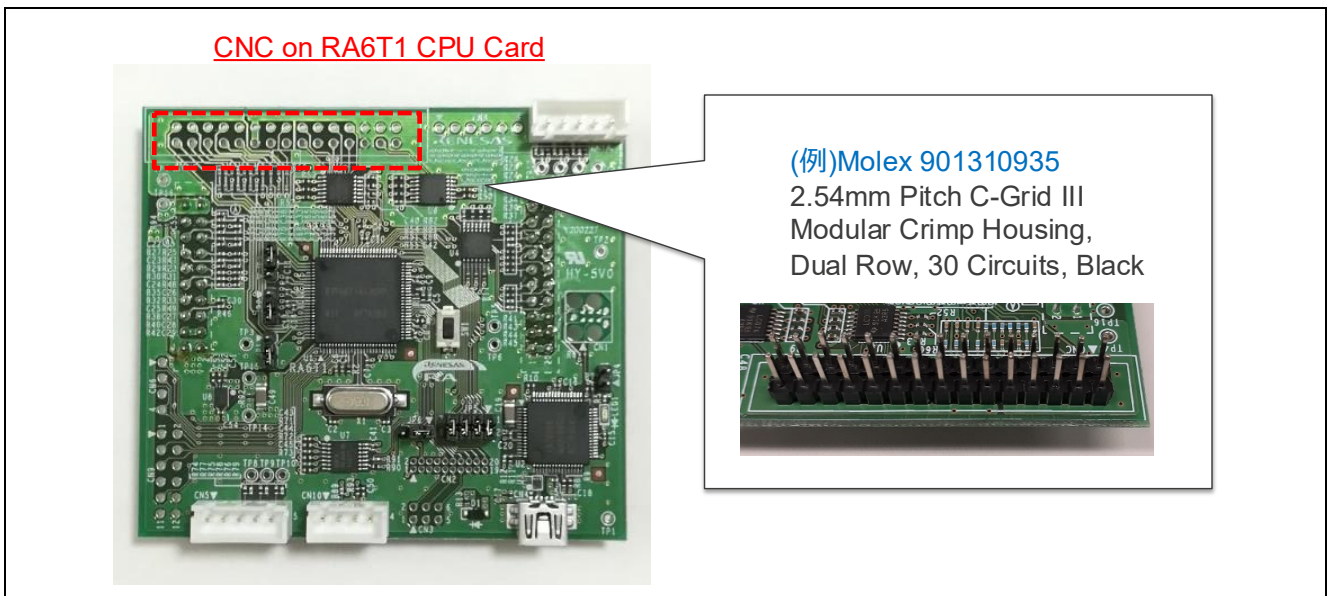


図 2-6 CPU カードピンヘッダ実装

④ インバータボードと CPU カード間の信号を接続します。

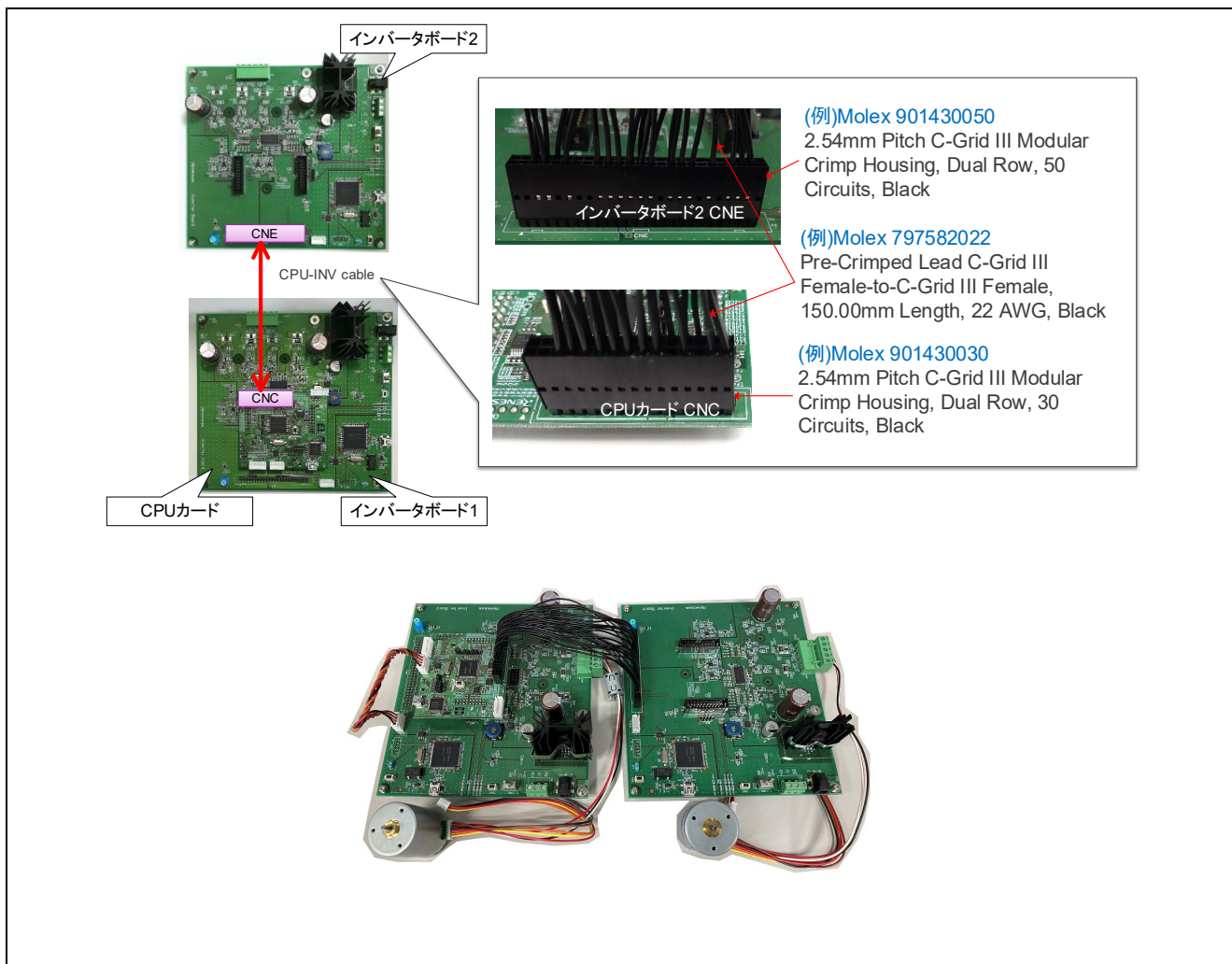


図 2-7 インバータボードと CPU カード間の接続

表 2-3 ピンアサイン表

INV (CNE)		RA6T1(CNC)	
Pin#	Pin name	Pin#	Pin name
3	GND_A	1	PGAVSS
12	VDC_EX	2	VPN
16	I_U/A+_EX	3	IU
18	I_V/B+_EX	4	IV
20	I_W/B-_EX	5	IW
4	V_U/A+_EX	7	VU
6	V_V/B+_EX	8	VV
8	V_W/B-_EX	9	VW
23	GND_D	11	VSS
19	GND_A	12	VSS
41	LED1	13	LED1
44	LED2	14	LED2
43	LED3	15	LED3
40	FO#_EX	16	OC#
24	PWM_WL/B-L_EX	17	WN
26	PWM_VL/B+L_EX	18	VN
28	PWM_UL/A+L_EX	19	UN
30	PWM_WH/B-_EX	20	WP
32	PWM_VH/B+H_EX	21	VP
34	PWM_UH/A+H_EX	22	UP
46	SW1	23	SW1
45	SW2	24	SW2
25	GND_D	25	VSS
27	GND_D	26	VSS

2.2.2.2 2 モータ用拡張ボードを使用する場合

2 モータ用拡張ボードを使用するとボード改造は少なく、市販のケーブルを使用し、1対1接続が実現できます。2 モータ用拡張ボードについては、APNに同梱している情報（CADデータ、回路図、BOMList）を参照ください。

- ① CPUカードの”CNC”にピンヘッダを実装します。

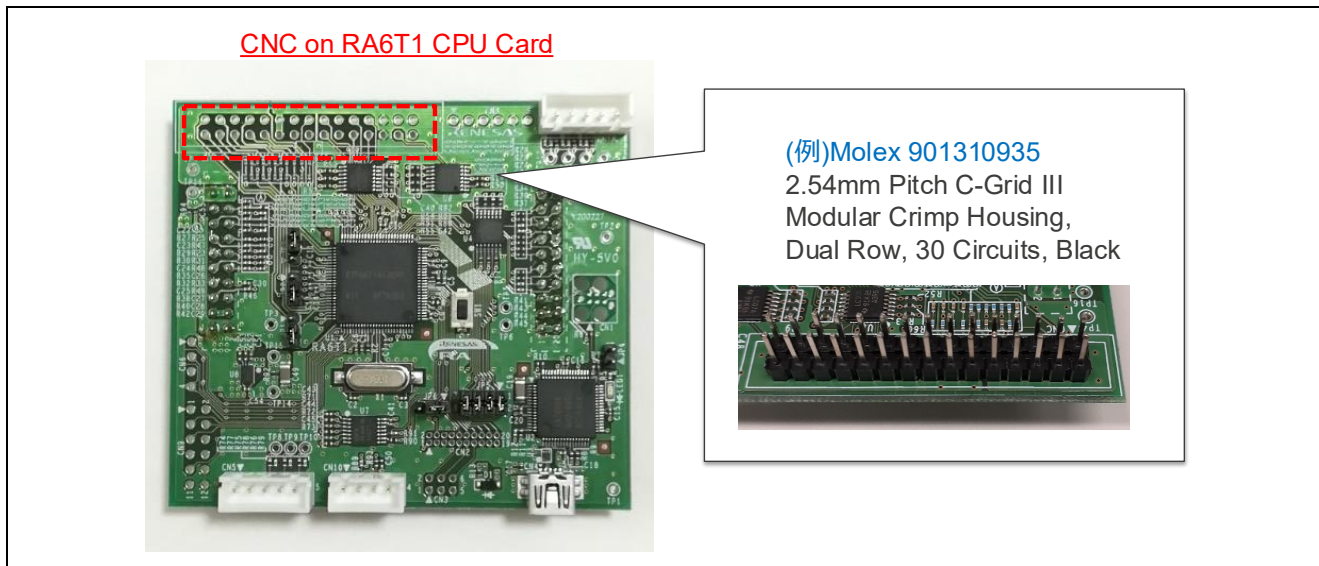


図 2-8 CPUカードピンヘッダ実装

② 2 モータ用拡張ボードと CPU カード間の信号を接続します。

2 モータ用拡張ボードの CNC が 34pin に対して、RA6T1 の CNC は 30pin であるため、エンベロープ無しのコネクタを実装しています。ケーブルで接続する際は、お互いのボードの 1PIN 側を合わせて接続するようにしてください。

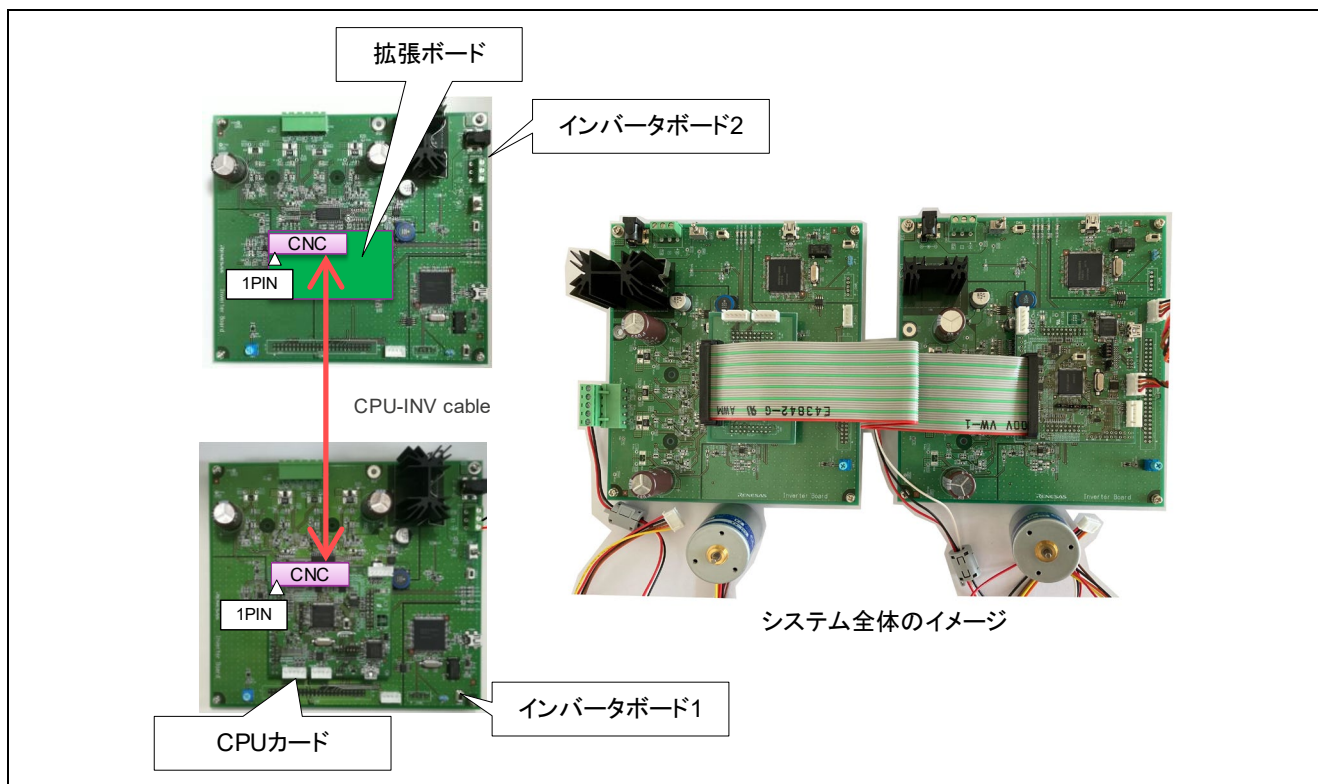


図 2-9 2 モータ用拡張ボードと CPU カード間の接続

表 2-4 ピンアサイン表

2 モータ用拡張ボード (CNC)		RA6T1(CNC)	
Pin#	Pin name	Pin#	Pin name
1	PGAVSS_2	1	PGAVSS
2	VPN_2	2	VPN
3	IU_2	3	IU
4	IV_2	4	IV
5	IW_2	5	IW
6	TEMP_2	6	NC
7	VU_2	7	VU
8	VV_2	8	VV
9	VW_2	9	VW
10	VR_2	10	NC
11	GND	11	VSS
12	GND	12	VSS
13	LED1#_2	13	LED1
14	LED2#_2	14	LED2
15	LED3#_2	15	LED3
16	FO#_2	16	OC#
17	WN_2	17	WN
18	VN_2	18	VN
19	UN_2	19	UN
20	WP_2	20	WP
21	VP_2	21	VP
22	UP_2	22	UP
23	SW1#_2	23	SW1
24	SW2#_2	24	SW2
25	GND	25	VSS
26	GND	26	VSS
27	ENC_A_2	27	P602
28	ENC_B_2	28	NC
29	ENC_Z_2	29	NC
30	GND	30	NC
31	GND	-	-
32	HALL_U_2	-	-
33	HALL_V_2	-	-
34	HALL_W_2	-	-

2.2.3 ボードユーザインタフェース

サンプルソフトウェアのユーザインタフェース一覧を表 2-5 に示します。

表 2-5 ユーザインタフェース

項目	インタフェース部品	機能
回転速度指令	モータ 1 側可変抵抗器(VR1_1)	回転速度指令値入力
START / STOP 1	モータ 1 側トグルスイッチ(SW1_1)	モータ 1 回転開始/停止指令
ERROR RESET 1	モータ 1 側プッシュスイッチ(SW2_1)	エラー状態からの復帰指令
LED1_1	モータ 1 側橙色 LED(LED1_1)	<ul style="list-style-type: none"> ● モータ 1 駆動時 : 点灯 ● モータ 1 停止時 : 消灯
LED2_1	モータ 1 側橙色 LED(LED2_1)	<ul style="list-style-type: none"> ● エラー検出時 : 点灯 ● 通常動作時 : 消灯
START / STOP 2	モータ 2 側トグルスイッチ(SW1_2)	モータ 2 回転開始/停止指令
ERROR RESET 2	モータ 2 側プッシュスイッチ(SW2_2)	エラー状態からの復帰指令
LED1_2	モータ 2 側橙色 LED(LED1_2)	<ul style="list-style-type: none"> ● モータ 2 駆動時 : 点灯 ● モータ 2 停止時 : 消灯
LED2_2	モータ 2 側橙色 LED(LED2_2)	<ul style="list-style-type: none"> ● 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

サンプルソフトウェアの端子インタフェースを表 2-6、表 2-7 に示します。

表 2-6 端子インタフェース (モータ 1 側)

機能	RA6T1
インバータ母線電圧測定	P014 / AN005
回転速度指令値入力(VR1_1)	P502 / AN017
START/STOP トグルスイッチ(SW1_1)	P302
ERROR RESET プッシュスイッチ(SW2_1)	P301
LED1_1 点灯/消灯制御	P408
LED2_1 点灯/消灯制御	P407
U1 相電流測定	P000 / AN000
W1 相電流測定	P002 / AN002
PWM 出力(U _p 1)	P415 / GTIOC0A
PWM 出力(V _p 1)	P113 / GTIOC2A
PWM 出力(W _p 1)	P111 / GTIOC3A
PWM 出力(U _n 1)	P414 / GTIOC0B
PWM 出力(V _n 1)	P114 / GTIOC2B
PWM 出力(W _n 1)	P112 / GTIOC3B
過電流検出時の PWM 緊急停止入力	P503 / GTETRGC

表 2-7 端子インタフェース (モータ 2 側)

機能	RA6T1
インバータ母線電圧測定	P008 / AN003
START / STOP トグルスイッチ(SW1_2)	P307
ERROR RESET プッシュスイッチ(SW2_2)	P306
LED1_2 点灯/消灯制御	P305
LED2_2 点灯/消灯制御	P304
U2 相電流測定	P004 / AN100
W2 相電流測定	P006 / AN102
PWM 出力(U _p 2)	P115 / GTIOC4A
PWM 出力(V _p 2)	P609 / GTIOC5A
PWM 出力(W _p 2)	P601 / GTIOC6A
PWM 出力(U _n 2)	P608 / GTIOC4B
PWM 出力(V _n 2)	P610 / GTIOC5B
PWM 出力(W _n 2)	P600 / GTIOC6B
過電流検出時の PWM 緊急停止入力	P104 / GTETRGB

2.2.4 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 2-8 に示します。

表 2-8 周辺機能対応表

周辺機能	用途	RA6T1
A/D コンバータ	U1 相電流測定	AN000
	W1 相電流測定	AN002
	インバータ母線電圧 1 測定	AN005
	VR1_1 入力	AN017
	U2 相電流測定	AN100
	W2 相電流測定	AN102
	インバータ母線電圧 2 測定	AN003
AGT	速度制御インターバルタイマ 1	AGT0
	速度制御インターバルタイマ 2	AGT1
GPT	U1 相 PWM 出力	CH0
	V1 相 PWM 出力	CH2
	W1 相 PWM 出力	CH3
	U2 相 PWM 出力	CH4
	V2 相 PWM 出力	CH5
	W2 相 PWM 出力	CH6
POEG	過電流検出時の PWM 緊急停止入力 1	GTETRGC
	過電流検出時の PWM 緊急停止入力 2	GTETRGB

(1) 12 ビット A/D コンバータ(ADC12)

モータ 1、モータ 2 の U 相電流、W 相電流、インバータ母線電圧、回転速度指令値を、「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、キャリア同期割込みと連動して動作させています。

(2) 低消費電力非同期汎用タイマ (AGT)

1[msec]インターバルタイマとして使用します。

(3) 汎用 PWM タイマ (GPT)

チャンネル 0、2、3、チャンネル 4、5、6 の 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。

(4) GPT 用ポートアウトプットイネーブル (POEG)

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

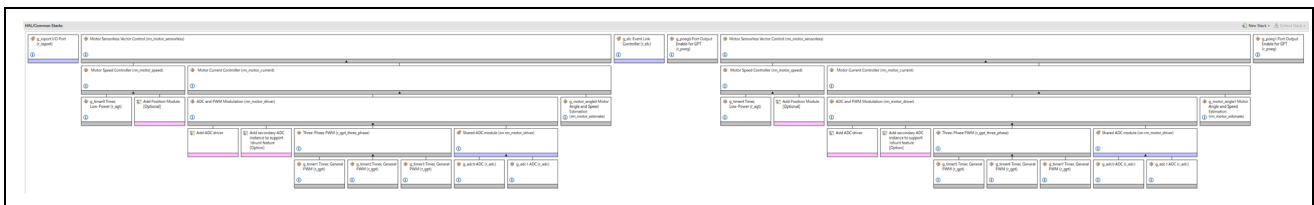


図 2-10 FSP スタック全体図

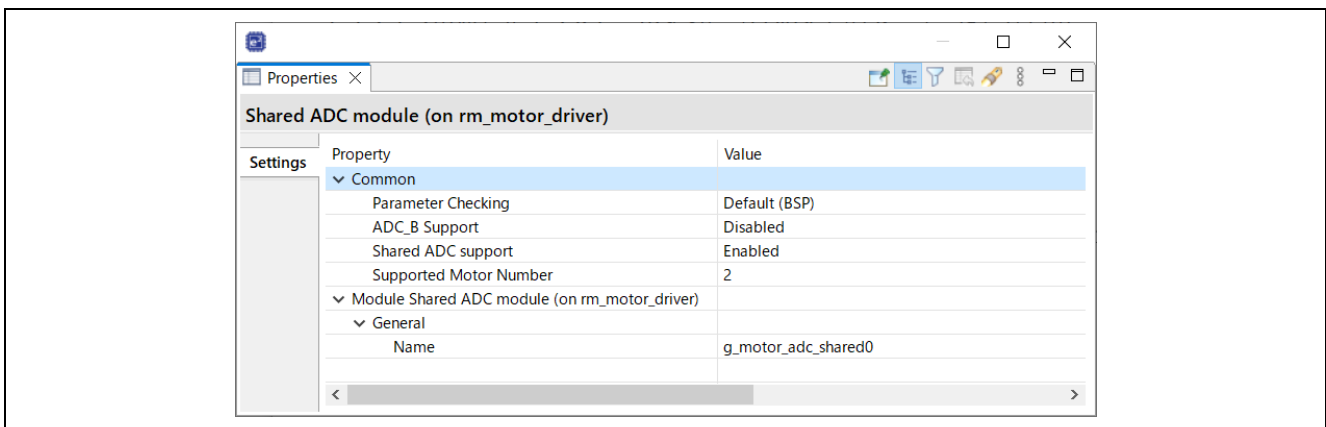


図 2-11 ADC シェアードモジュールの FSP コンフィグレーション

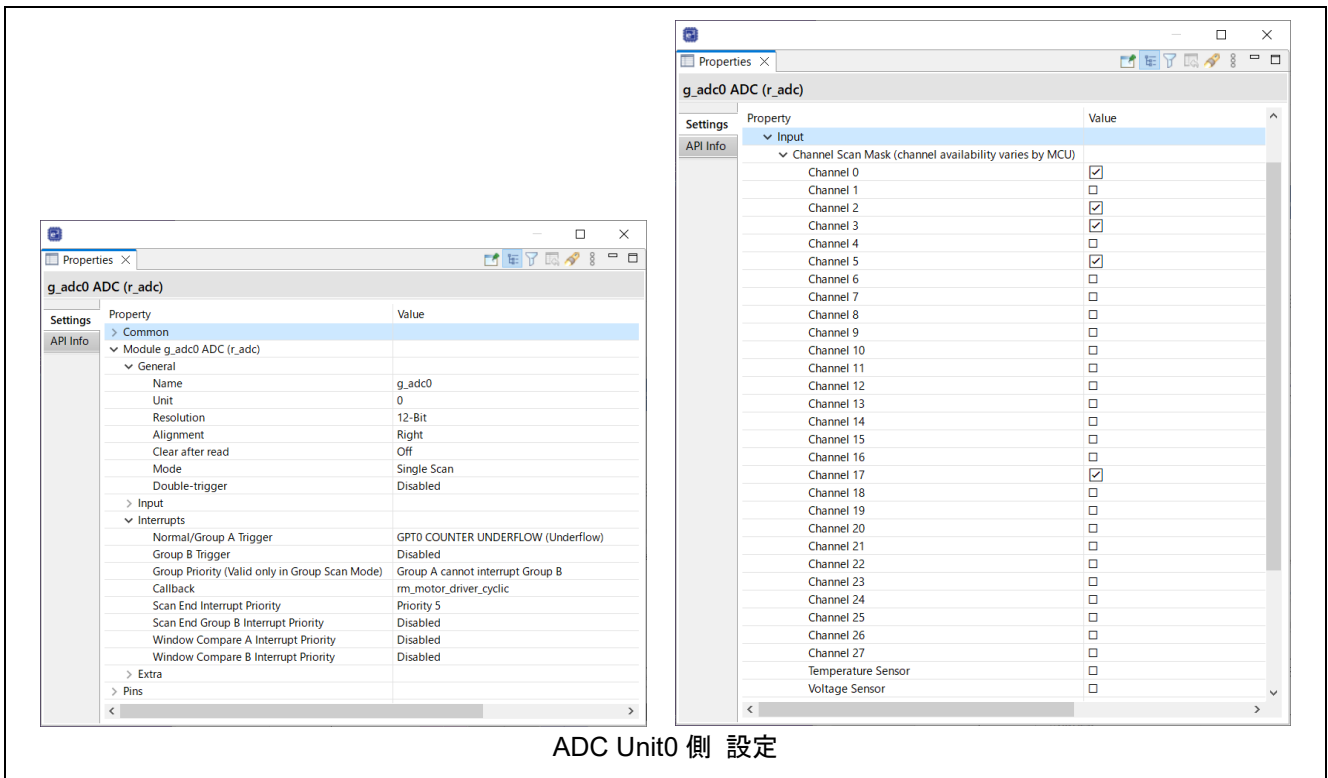


図 2-12 ADC ドライバの FSP コンフィグレーション [1/2]

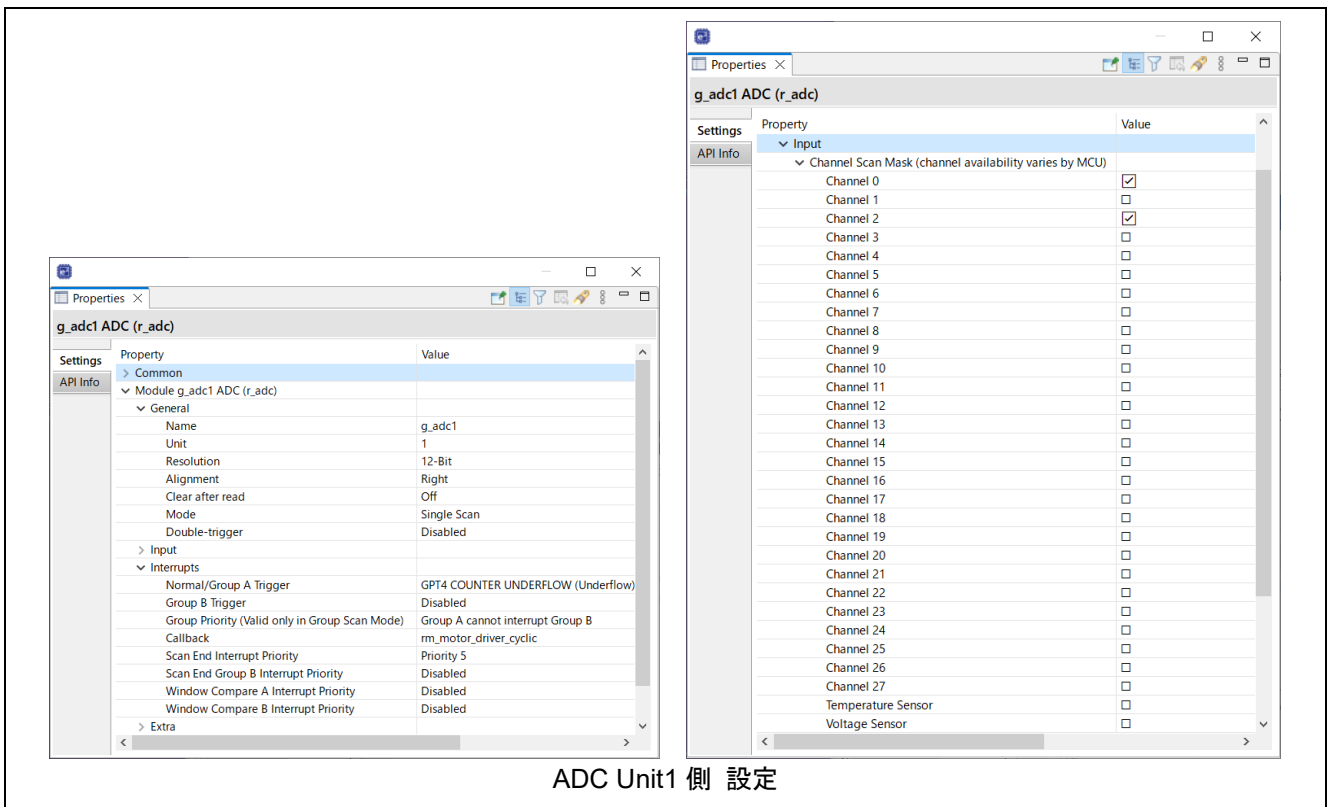
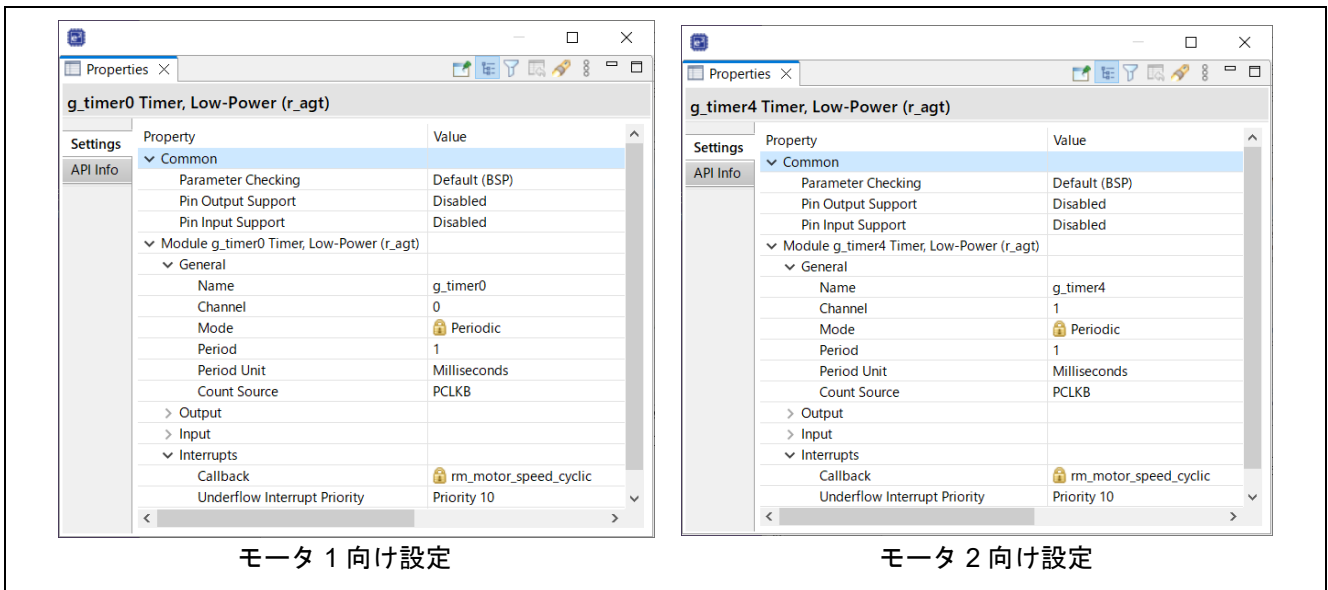


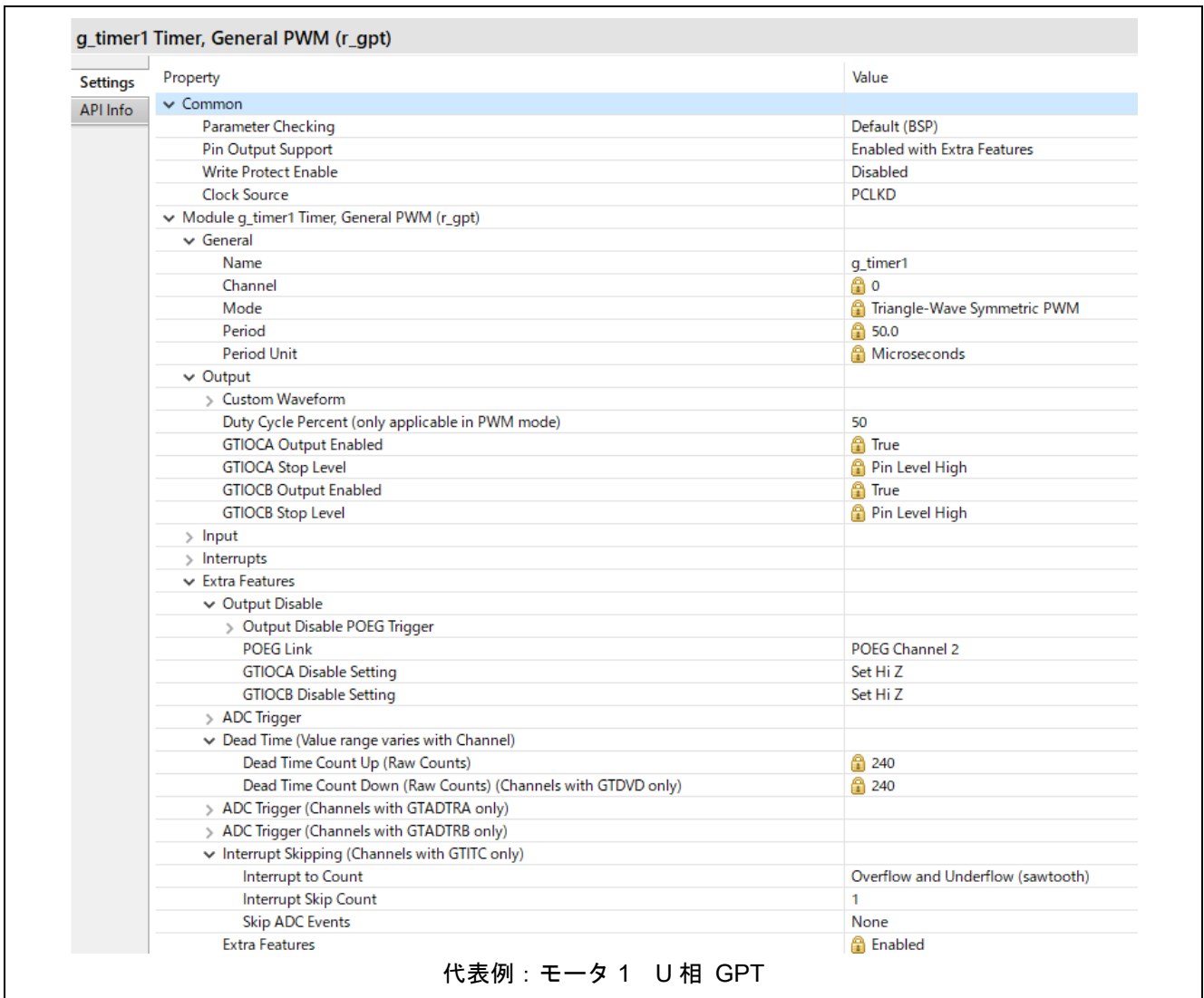
図 2-13 ADC ドライバの FSP コンフィグレーション [2/2]



モータ 1 向け設定

モータ 2 向け設定

図 2-14 AGT ドライバの FSP コンフィグレーション



代表例：モータ 1 U 相 GPT

図 2-15 GPT ドライバの FSP コンフィグレーション

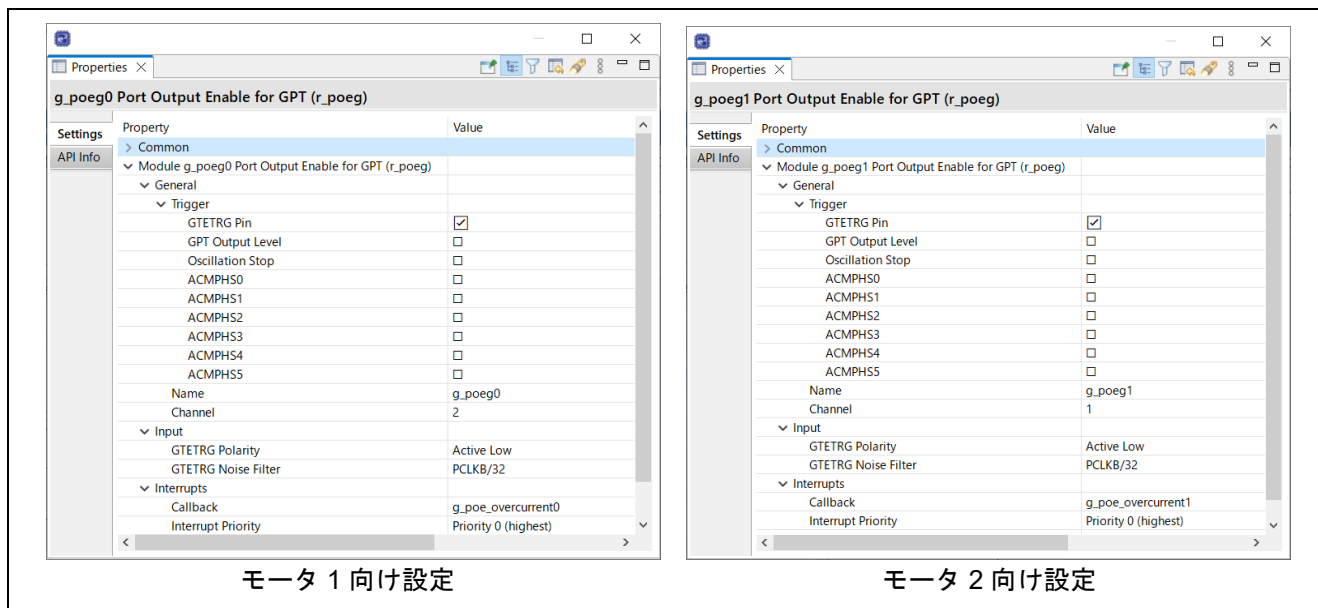


図 2-16 POEG ドライバの FSP コンフィグレーション

2.3 ソフトウェア構成

2.3.1 ソフトウェア・ファイル構成

ソフトウェアのフォルダとファイル構成を下記に示します。

表 2-9 ソフトウェアフォルダ構成[1/2]

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
ra_cfg			自動生成のコンフィグヘッダ
ra_gen			自動生成のレジスタ設定値、メイン関数等
ra	arm		CMSIS ソースコード
	board		ボード関連関数定義
	fsp/inc/api	bsp_api.h	BSP API 定義
		r_adc_api.h	AD API 定義
		r_ioport_api.h	I/O API 定義
		r_poeg_api.h	POEG API 定義
		r_three_phase_api.h	3相 PWM API 定義
		r_timer_api.h	タイマ API 定義
		r_transfer_api.h	データ転送 API 定義
		rm_motor_angle_api.h	角度 API 定義
		rm_motor_api.h	モータ API 定義
		rm_motor_current_api.h	電流制御 API 定義
		rm_motor_driver_api.h	モータドライバ API 定義
		rm_motor_speed_api.h	速度 API 定義
	fsp/inc/instances	r_adc.h	AD 関連定義
		r_agt.h	AGT 関連定義
		r_gpt_three_phase.h	3相 PWM 関連定義
		r_gpt.h	GPT 関連定義
		r_ioport.h	I/O 関連定義
		r_poeg.h	POEG 関連定義
		rm_motor_current.h	電流制御関連定義
		rm_motor_driver.h	モータドライバ関連定義
		rm_motor_estimate.h	角速度推定処理関連定義
		rm_motor_sensorless.h	センサレス制御関連定義
		rm_motor_speed.h	速度関連定義
	fsp/lib		ライブラリファイル
	fsp/src	bsp	BSP 関連フォルダ
		r_adc/r_adc.c	AD ドライバ
		r_agt/r_agt.c	AGT ドライバ
		r_gpt/r_gpt.c	GPT ドライバ
		r_gpt_three_phase/r_gpt_three_phase.c	3相 PWM ドライバ
		r_ioport/r_ioport.c	I/O ドライバ
		r_poeg/r_poeg.c	POEG ドライバ
rm_motor_current/rm_motor_current.c		電流制御ドライバ	
rm_motor_current/rm_motor_current_library.h		電流制御ライブラリ API 定義	

表 2-10 ソフトウェアフォルダ構成[2/2]

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
ra	fsp/src	rm_motor_driver/rm_motor_driver.c	モータドライバ
		rm_motor_estimate/rm_motor_estimate.c	角度推定ドライバ
		rm_motor_estimate/rm_motor_estimate_library.h	角度推定ライブラリ API 定義
		rm_motor_sensorless/rm_motor_sensorless.c	センサレスモータドライバ
		rm_motor_speed/rm_motor_speed.c	速度制御ドライバ
		rm_motor_speed/rm_motor_speed_library.h	速度制御ライブラリ API 定義
src	application/main	mtr_main.h , mtr_main.c	ユーザメイン関数
		r_mtr_control_parameter.h	制御パラメータ定義
		r_mtr_motor_parameter.h	モータパラメータ定義
	application/user_interface/ics	r_mtr_ics.h , r_mtr_ics.c	Analyzer UI 関連関数定義
		ICS2_RA6T1.h	ツール用通信ライブラリ
		ICS2_RA6T1.o	ツール用通信関連定義

2.3.2 モジュール構成

サンプルソフトウェアのモジュール構成を図 2-17 に示します。

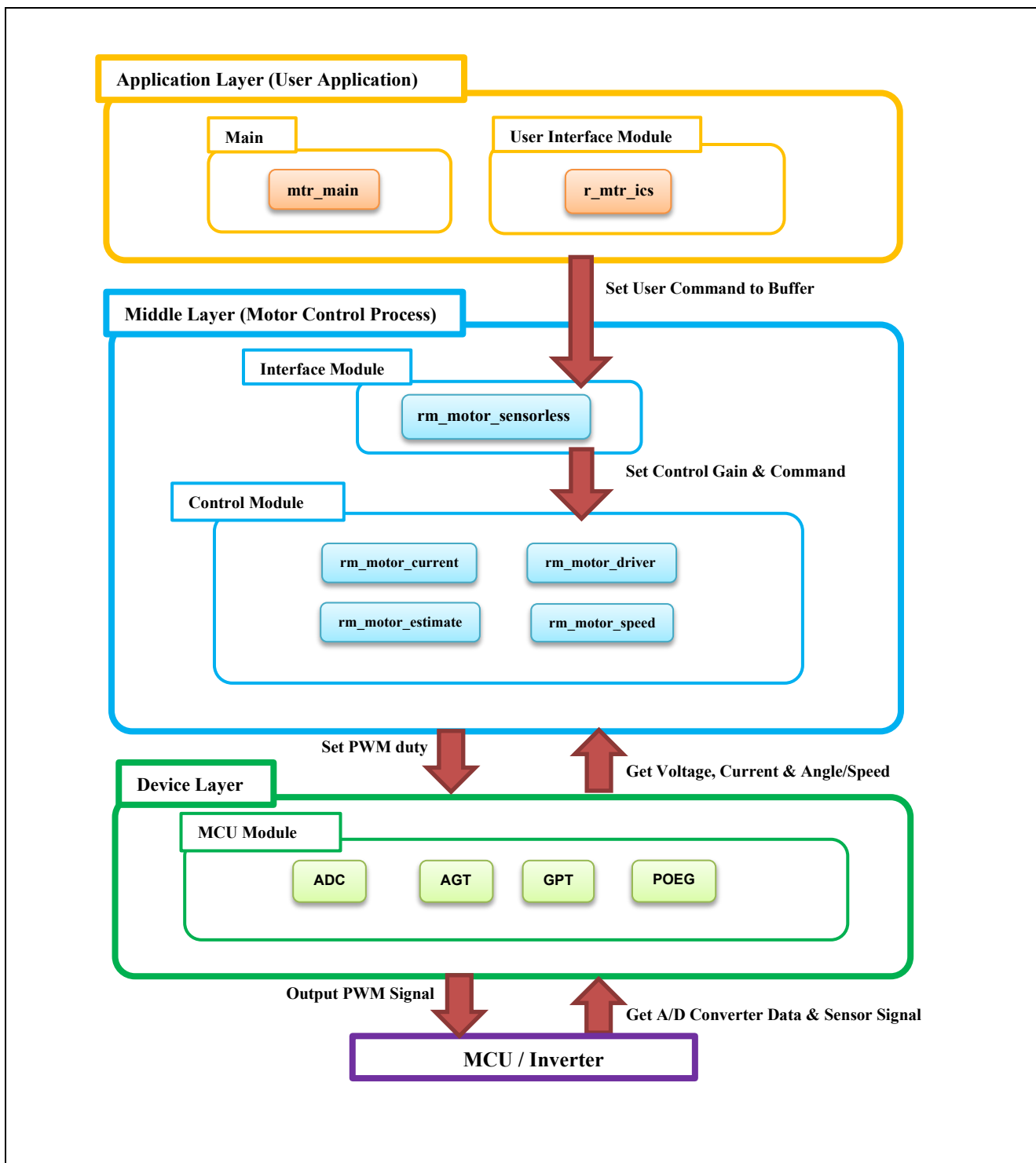


図 2-17 モジュール構成

2.4 ソフトウェアスペック

サンプルソフトウェアのソフトウェア基本仕様を下記に示します。

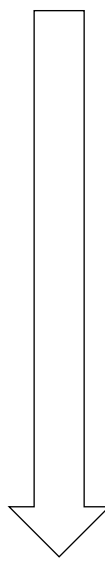
表 2-11 センサレスベクトル制御ソフトウェア基本仕様

項目	内容	
制御方式	ベクトル制御	
回転子磁極位置検出	センサレス	
モータ回転開始/停止	モータ 1 は SW1_1、モータ 2 は SW1_2 のレベルにより判定 または Renesas Motor Workbench から入力	
入力電圧	DC 24V	
メインクロック周波数	120 [MHz]	
キャリア(PWM)周波数	20 [kHz](キャリア周期 : 50 [μs])	
デッドタイム	2 [μs]	
制御周期	電流制御 / 位置・速度推定 : 100 [μs] 速度制御 : 1 [ms]	
回転速度範囲	CW : 0 [rpm] ~ 2650 [rpm] CCW : 0 [rpm] ~ 2650 [rpm] ただし、600 [rpm]以下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] 誘起電圧推定系 : 1000 [Hz] 位置推定系 : 50 [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	<p>【モータ 1】</p> <p>以下のいずれかの条件の時、モータ 1 制御信号出力(6 本)を非アクティブにする</p> <p>(1) 各相の電流が $0.89(=0.42 \times \sqrt{2}) \times 1.5$ [A]を超過(電流制御周期で監視)</p> <p>(2) インバータ母線電圧が 28 [V]を超過(電流制御周期で監視)</p> <p>(3) インバータ母線電圧が 14[V]未満(電流制御周期で監視)</p> <p>(4) 回転速度が 3000 [rpm]を超過(電流制御周期で監視)</p> <p>外部からの過電流検出信号を検出した場合、PWM 出力端子をハイインピーダンスにする</p>	<p>【モータ 2】</p> <p>以下のいずれかの条件の時、モータ 2 制御信号出力(6 本)を非アクティブにする</p> <p>(1) 各相の電流が $0.89(=0.42 \times \sqrt{2}) \times 1.5$ [A]を超過(電流制御周期で監視)</p> <p>(2) インバータ母線電圧が 28 [V]を超過(電流制御周期で監視)</p> <p>(3) インバータ母線電圧が 14[V]未満(電流制御周期で監視)</p> <p>(4) 回転速度が 3000 [rpm]を超過(電流制御周期で監視)</p> <p>外部からの過電流検出信号を検出した場合、PWM 出力端子をハイインピーダンスにする</p>

2.5 割り込み優先順位

サンプルソフトウェアで使用している割り込みと優先順位を以下に示します。

表 2-12 割り込み優先順位

割り込みレベル	優先度	処理
15	Min  Max	
14		
13		
12		
11		
10		AGT0/1 INT 1[ms]割り込み処理（モータ 1/2 共に同レベル）
9		
8		
7		
6		
5		ADC0 ADI0/2 A/D 変換完了割り込み（モータ 1/2 共に同レベル）
4		
3		
2		
1		
0		POEG1/2 EVENT 過電流異常割り込み（モータ 1/2 共に同レベル）

Allocations		
Interrupt	Event	ISR
0	AGT0 INT (AGT interrupt)	agt_int_isr
1	ADC0 SCAN END (A/D scan end interrupt)	adc_scan_end_isr
2	ADC1 SCAN END (A/D scan end interrupt)	adc_scan_end_isr
3	POEG2 EVENT (Port Output disable interrupt C)	poeg_event_isr
4	AGT1 INT (AGT interrupt)	agt_int_isr
5	POEG1 EVENT (Port Output disable interrupt B)	poeg_event_isr

図 2-18 FSP 割り込みコンフィグレーション

3. 制御ソフトウェア説明

3.1 制御内容

3.1.1 モータ起動/停止

モータの起動と停止は、Renesas Motor Workbench からの入力または SW1_1、SW1_2 からの入力によって制御します。SW1_1、SW1_2 には汎用ポートが割り当てられ、"Low"レベルのときスタートスイッチが押されていると判断し、"High"レベルのときはモータを停止すると判断します。

3.1.2 A/D 変換

(1) モータ回転速度指令値

モータの回転速度指令値は Renesas Motor Workbench からの入力または VR1 の出力値(アナログ値)を A/D 変換することによって決定します。インバータボード 1 の VR1 を使用して、モータ 1、モータ 2 両方の回転速度を決定します。A/D 変換された値は、以下の表のように、回転速度指令値として使用します。

表 3-1 回転速度指令値の変換比

項目	変換比 (指令値 : A/D 変換値)	
回転速度指令値	CW	0 [rpm]~2650[rpm] : 0800H~0FFFH
	CCW	0 [rpm]~2650[rpm] : 07FFH~0000H

(2) インバータ母線電圧

以下の表のように、インバータ母線電圧を測定します。変調率の算出と過電圧・低電圧検出(異常時は PWM 停止)に使用します。

表 3-2 インバータ母線電圧の変換比

項目	変換比 (インバータ母線電圧 : A/D 変換値)
インバータ母線電圧	0 [V]~111 [V] : 0000H~0FFFH

(3) U 相、W 相電流

以下の表のように、U 相、W 相電流を測定し、ベクトル制御に使用します。

表 3-3 U、W 相電流の変換比

項目	変換比 (U 相、W 相電流 : A/D 変換値)
U 相、W 相電流	-12.5 [A]~12.5 [A] : 0000H~0E8BH $\text{電流値} = (5\text{V} - 2.5\text{V}) / (0.01\ \Omega \times 20) = 12.5\text{A}$ このシステムでは電流検出回路を 5V から 3V にレベルシフトしているため、0E8BH が A/D 変換の上限となります。

3.1.3 変調

サンプルソフトウェアでは、モータへの入力電圧はパルス幅変調（以降、PWM）によって生成します。PWM Duty 比の算出を行い、電圧利用効率を上げるために、変調を行った電圧を出力できます。

3.1.3.1 正弦波変調

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 : 指令値電圧 E : インバータ母線電圧

3.1.3.2 空間ベクトル変調

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。ところが、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[%]となってしまいます。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。

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

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

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

3.1.4 状態遷移

図 3-1 にサンプルソフトウェアにおける状態遷移図を示します。サンプルソフトウェアでは、「SYSTEM MODE」により状態を管理します。モータ 1、モータ 2 共に同じ制御になります。

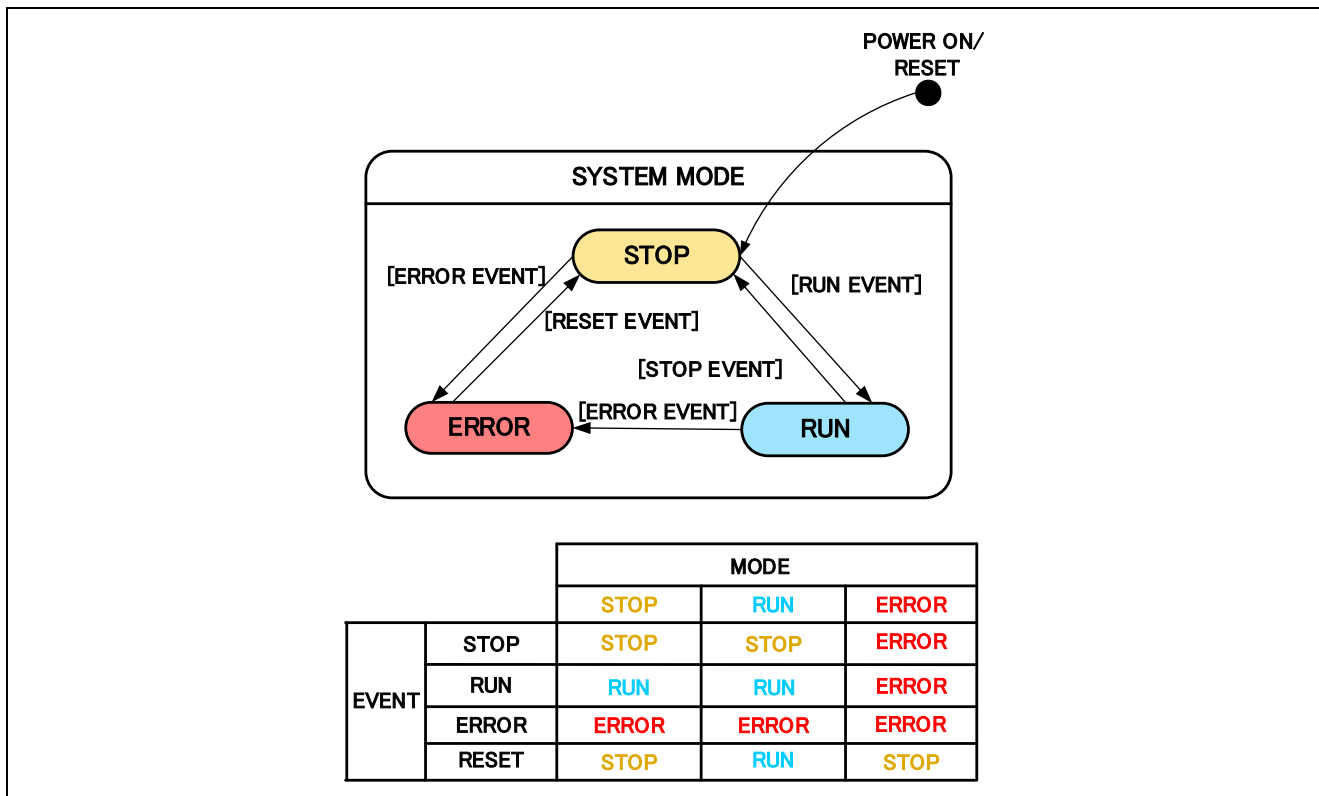


図 3-1 センサレスベクトル制御ソフトウェアの状態遷移図

(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) 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 3-1 中の表の様に遷移します。各 EVENT の発生要因は下記となります。

表 3-4 EVENT 一覧

イベント名	発生要因
STOP	ユーザー操作により発生します
RUN	ユーザー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	ユーザー操作により発生します

3.1.5 始動方法

サンプルソフトウェアの始動制御内容を図 3-2 に示します。d 軸電流、q 軸電流、速度それぞれの指令値を管理するフラグによってモードをコントロールしています。モータ 1、モータ 2 共に同じ制御となります。

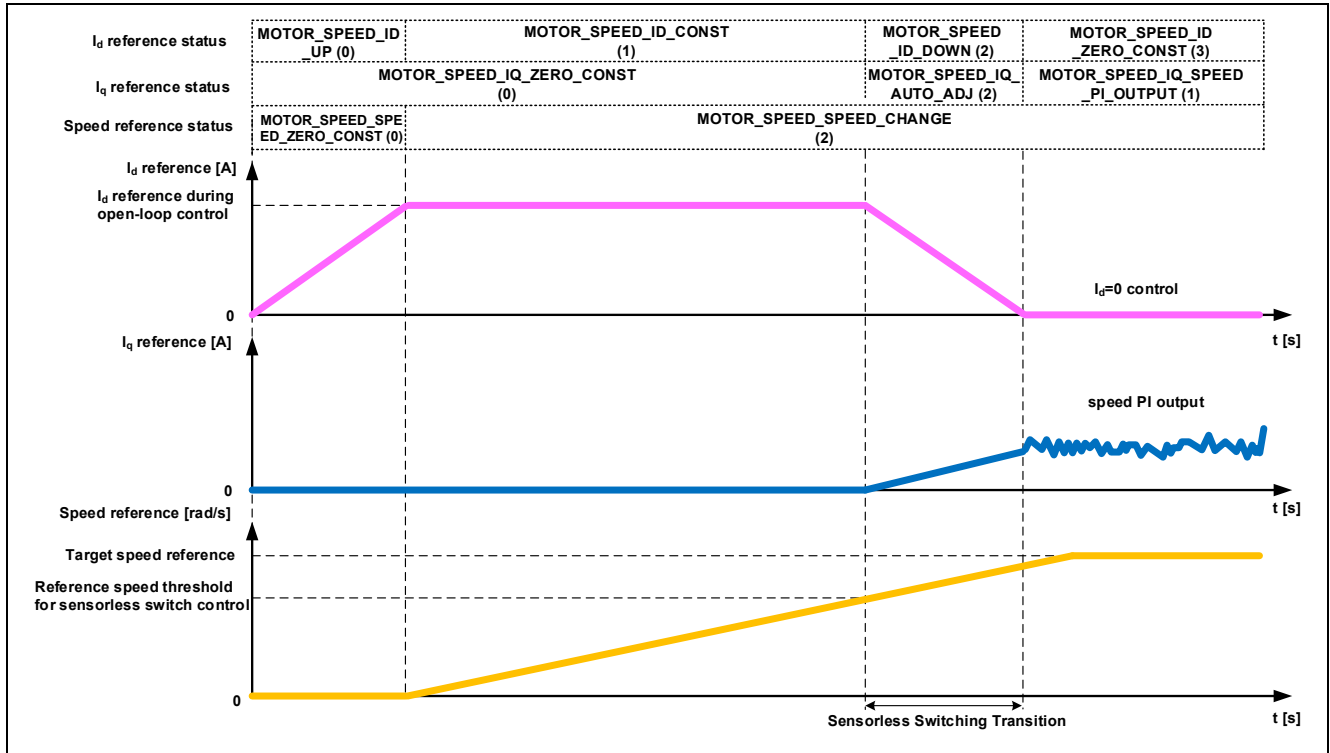


図 3-2 センサレスベクトル制御ソフトウェアの始動制御内容

3.1.6 保護機能

サンプルソフトウェアは、以下のエラー状態を持ち、それぞれの場合に緊急停止する機能を実装していません。システム保護機能に関わる各設定値は表 3-5 を参照してください。

- 過電流エラー
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。

表 3-5 各システム保護機能設定値

エラー	閾値		監視周期
	項目	値	
過電流エラー	過電流リミット値 [A]	0.89	電流制御周期
過電圧エラー	過電圧リミット値 [V]	28	電流制御周期
低電圧エラー	低電圧リミット値 [V]	14	電流制御周期
回転速度エラー	速度リミット値 [rpm]	3000	電流制御周期

3.1.7 キャリア同期割込み

2 モータ制御の場合、1つの割込み処理内で2つのモータを制御すると順次処理となるため、次のPWMのduty更新に間に合わない場合があります。そのため、キャリア同期割込みをモータ1、モータ2用に異なるタイミングで発生させます。

本制御プログラムでは、モータ2側キャリア周期の調整を行うことで実現しています。

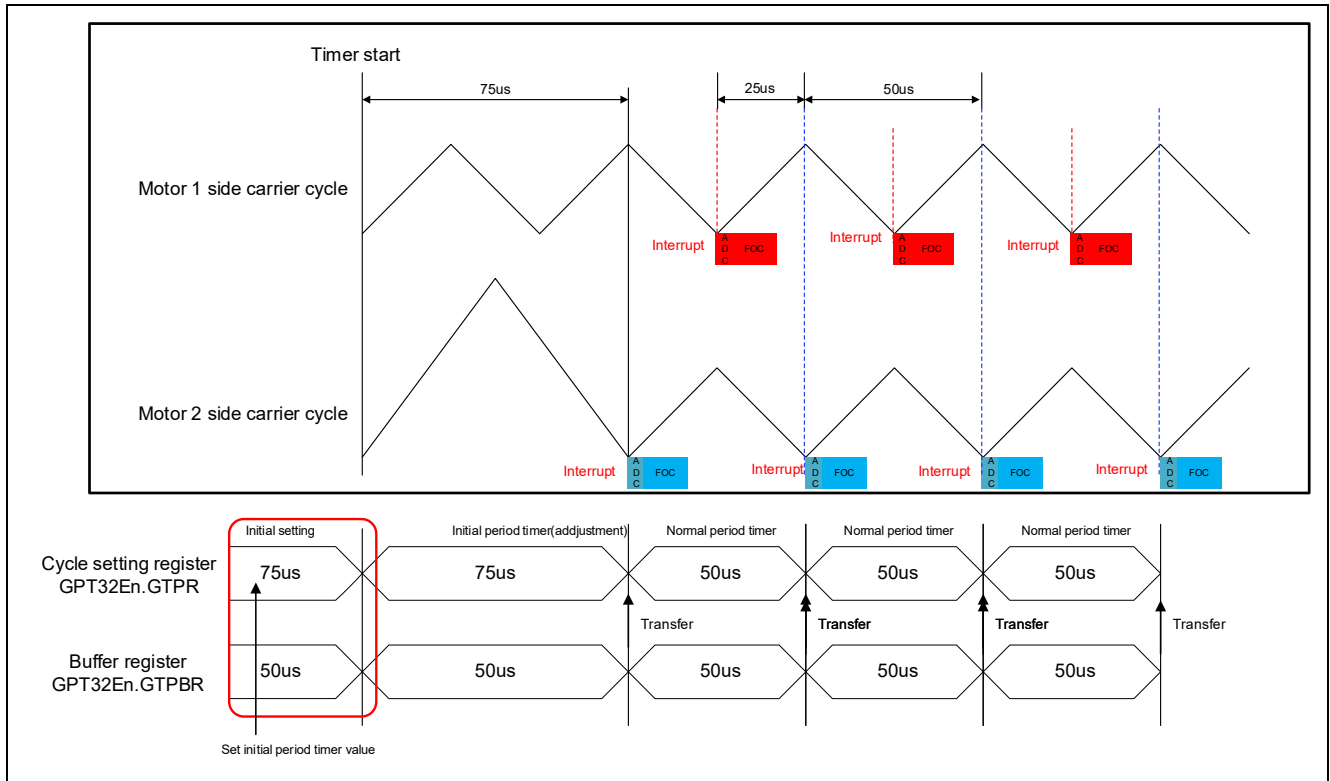


図 3-3 キャリア出力調整

この設定によって、モータ2側キャリア周期100[μs]が終了したのち、以降の周期が50[μs]となります。その為、キャリア同期割込みは同時に発生しなくなります。尚、モータ1とモータ2のキャリア同期割込みは、PWMキャリア周期に対し1回間引きを行っている為、100[μs]周期で交互に発生します。その為、割込みの処理時間（エラー発生時の処理時間含めて）を、100[μs]内に収める必要があります。

3.2 センサレスベクトル制御ソフトウェア関数仕様

センサレスベクトル制御の制御ブロック図を示します。

割り込みタイミングの関係上、モータ 1 とモータ 2 の PWM のキャリア周波数と制御周期の設定を妥当なものとする必要があります。本サンプルプログラムでは PWM キャリア周波数 : 20kHz(50μsec)、電流制御周期 : 100μsec としています。

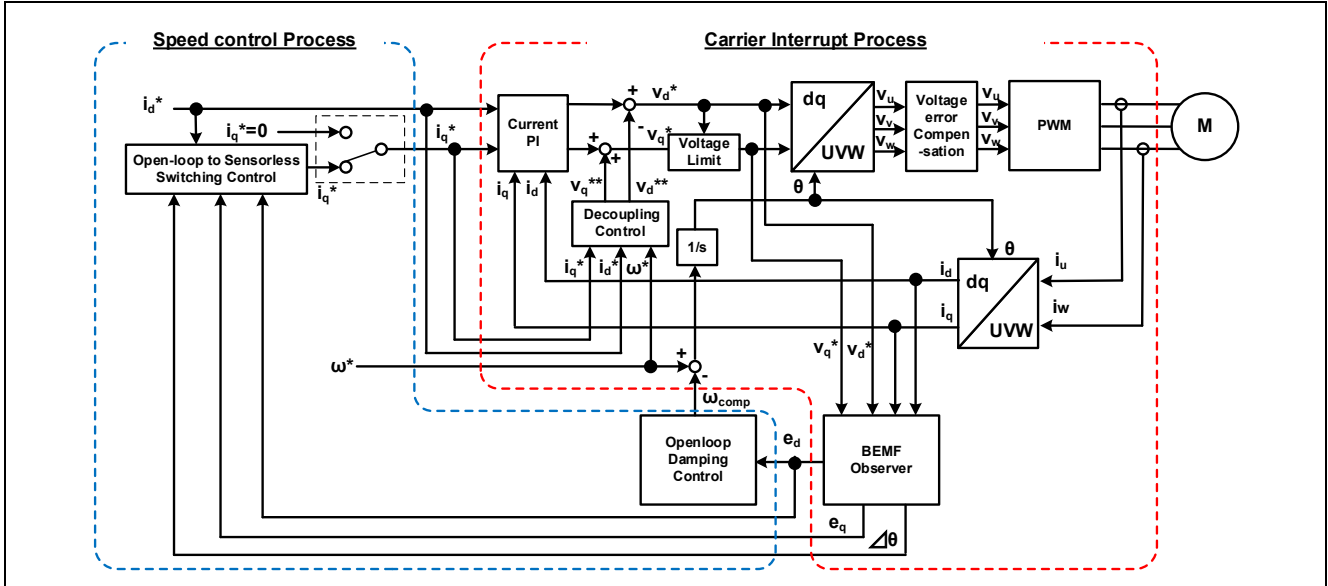


図 3-4 センサレスベクトル制御概略ブロック図(オープンループ制御時)

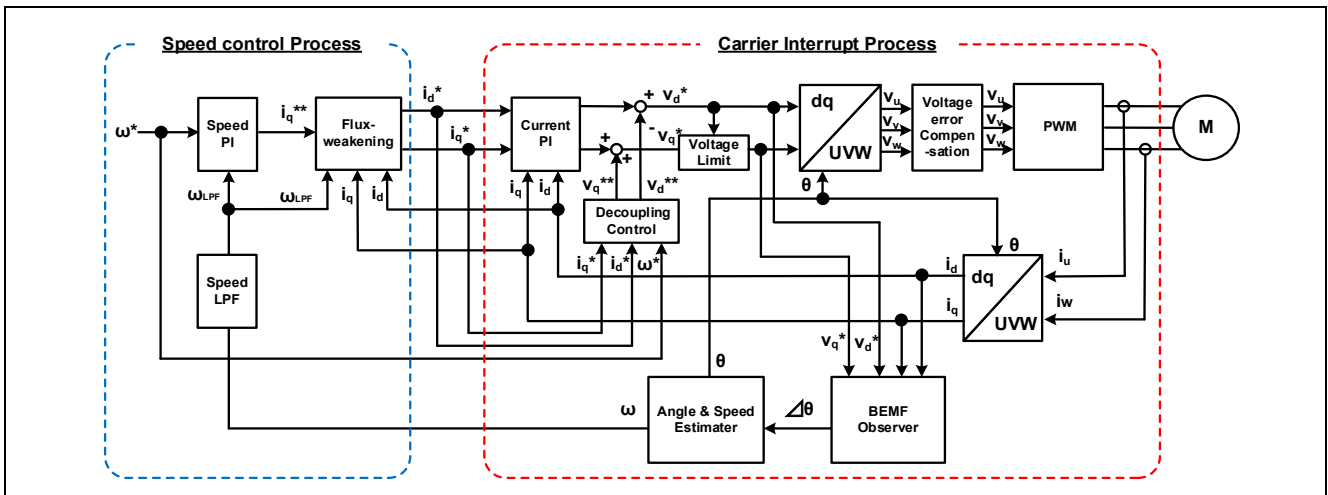


図 3-5 センサレスベクトル制御概略ブロック図(センサレス制御時)

3.3 関数一覧表

表 3-6 電流制御周期割り込み関数内実行関数一覧(1/5)

ファイル名	関数名	処理概要
mtr_main.c	mtr_callback_event0 入力 : (motor_callback_args_t *) p_args / コールバック関数パラメータデータ 出力 : なし	センサレス制御コールバック関数
	mtr_callback_event1 入力 : (motor_callback_args_t *) p_args / コールバック関数パラメータデータ 出力 : なし	センサレス制御コールバック関数
rm_motor_sensorless.c	rm_motor_sensorless_current_callback 入力 : (motor_current_callback_args_t *) p_args / コールバック関数パラメータデータ 出力 : なし	速度制御の出力を電流制御の入力にセット
	RM_MOTOR_SENSORLESS_ErrorCheck 入力 : (motor_ctrl_t * const) p_ctrl / モータ制御構造体ポインタ (uint16_t * const) p_error / モータエラー情報 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	エラーチェック
	rm_motor_sensorless_copy_speed_current 入力 : (motor_speed_output_t *) st_output / 速度制御出力データ (motor_current_input_t *) st_input / 電流制御入力データ 出力 : なし	速度出力データを電流入力データにコピー

表 3-7 電流制御周期割り込み関数内実行関数一覧(2/5)

ファイル名	関数名	処理概要
rm_motor_driver.c	rm_motor_driver_cyclic 入力 : (adc_callback_args_t *) p_args / コールバック関数パラメータデータ 出力 : なし	モータドライバコールバック関数
	rm_motor_driver_current_get 入力 : (motor_driver_instance_ctrl_t *) p_ctrl / モータドライバインスタンス 出力 : なし	A/D 変換データを取得 (相電流と母線電圧)
	RM_MOTOR_DRIVER_FlagCurrentOffsetGet 入力 : (motor_driver_ctrl_t * const) p_ctrl / モータドライバ制御構造体ポインタ (uint8_t * const) p_flag_offset / 電流オフセット検出完了フラグ 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	電流オフセット値を測定
	RM_MOTOR_DRIVER_PhaseVoltageSet 入力 : (motor_driver_ctrl_t * const) p_ctrl / モータドライバ制御構造体ポインタ (float const) u_voltage / U 相電圧 (float const) v_voltage / V 相電圧 (float const) w_voltage / W 相電圧 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	PWM デューティ計算用の相電圧データを設定
	rm_motor_driver_modulation 入力 : (motor_driver_instance_ctrl_t *) p_ctrl / モータドライバインスタンス 出力 : なし	PWM 変調の実行
	rm_motor_driver_mod_run 入力 : (motor_driver_modulation_t *) p_mod / 変調データ (const float *) p_f4_v_in / 入力三相電圧 (float *) p_f4_duty_out / 出力デューティ 出力 : なし	入力三相電圧 (バイポーラ) からデューティサイクルを計算
	rm_motor_driver_set_uvw_duty 入力 : (motor_driver_instance_ctrl_t *) p_ctrl / モータドライバインスタンス (float) f_duty_u / U 相デューティ (float) f_duty_v / V 相デューティ (float) f_duty_w / W 相デューティ 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	PWM デューティ設定
	RM_MOTOR_DRIVER_CurrentGet 入力 : (motor_driver_ctrl_t * const) p_ctrl / モータドライバコントロールブロック (motor_driver_current_get_t * const) p_current_get / 取得データ 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	相電流、Vdc、Va_max データを取得

表 3-8 電流制御周期割り込み関数内実行関数一覧(3/5)

ファイル名	関数名	処理概要
rm_motor_current.c	rm_motor_current_cyclic 入力 : (motor_driver_callback_args_t *) p_args / コールバック関数パラメータデータ 出力 : なし	電流制御周期動作
	RM_MOTOR_CURRENT_ParameterSet 入力 : (motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流制御構造体ポインタ (motor_current_input_current_t const * const) p_st_input / インプット電流データ 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	電流制御入力データを設定
	RM_MOTOR_CURRENT_CurrentSet 入力 : (motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流制御構造体ポインタ (motor_current_input_current_t const * const) p_st_current / インプット電流データ (motor_current_input_voltage_t const * const) p_st_voltage / インプット電圧データ 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	d/q 軸の電流と電圧のデータを設定
	RM_MOTOR_CURRENT_CurrentGet 入力 : (motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流制御構造体ポインタ (float * const) p_id / 取得した d 軸電流へのポインタ (float * const) p_iq / 取得した q 軸電流へのポインタ 出力 : fsp_err_t / 関数実行結果	d/q 軸電流を取得
	motor_current_transform_uv_w_dq_abs 入力 : (const float) f_angle / 回転角度 (const float *) f_uv_w / UVW 相ポインタ (float *) f_dq / dq 軸ポインタ 出力 : なし	UVW → dq 座標変換(絶対変換)

表 3-9 電流制御周期割り込み関数内実行関数一覧(4/5)

ファイル名	関数名	処理概要
rm_motor_current.c	motor_current_angle_cyclic 入力: (motor_current_instance_t *) p_instance / 電流インスタンス 出力: なし	電流制御の周期動作における角度/速度プロセス
	RM_MOTOR_CURRENT_SpeedPhaseSet 入力: (motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流制御構造体ポインタ (float const) speed_rad / 回転速度 (float const) phase_rad / 位相 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	電流速度とローター位相データを設定
	RM_MOTOR_CURRENT_CurrentReferenceSet 入力: (motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流制御構造体ポインタ (float const) speed_rad / 回転速度 (float const) phase_rad / 位相 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	電流指令値を設定
	RM_MOTOR_CURRENT_PhaseVoltageGet 入力: (motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流制御構造体ポインタ (motor_current_get_voltage_t * const) p_voltage / 取得電圧データ 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	設定された相電圧を取得
	motor_current_pi_calculation 入力: (motor_current_instance_ctrl_t *) p_instance / 電流インスタンスコントロール 出力: なし	電流ベクトルコマンドと実際の電流ベクトルから出力電圧ベクトルを計算
	motor_current_pi_control 入力: (motor_current_pi_params_t *) pi_ctrl / PI 制御パラメータ 出力: float / PI 制御出力値	PI 制御
	motor_current_limit_abs 入力: (float) f4_value / ターゲットの値 (float) f4_limit_value / 制限値 出力: float / 制限した値	絶対値の制限
	motor_current_decoupling 入力: (motor_current_instance_ctrl_t *) p_ctrl / 電流制御インスタンス (float) f_speed_rad / 回転速度 (const motor_current_motor_parameter_t *) p_mtr / モータ電流パラメータ 出力: なし	非干渉制御
motor_current_voltage_limit 入力: (motor_current_instance_ctrl_t *) p_ctrl / 電流制御インスタンス 出力: なし	電圧ベクトルの制限	

表 3-10 電流制御周期割り込み関数内実行関数一覧(5/5)

ファイル名	関数名	処理概要
rm_motor_current.c	motor_current_transform_dq_uvuw_abs 入力: (const float) f_angle / 回転角度 (const float *) f_dq / dq 軸ポインタ (float *) f_uvuw / UVW 相ポインタ 出力: なし	dq → UVW 座標変換(絶対変換)
librm_motor_current.a	rm_motor_voltage_error_compensation_main 入力: (motor_currnt_voltage_compensation_t *) st_volt_comp / 電圧誤差補償データ (float *) p_f4_v_array / リファレンス電圧 (float *) p_f4_i_array / リファレンス電流 (float) f4_vdc / 母線電圧 出力: なし	電圧誤差補償
rm_motor_estimate.c	RM_MOTOR_ESTIMATE_FlagPiCtrlSet 入力: (motor_angle_ctrl_t * const) p_ctrl / 角度制御構造体ポインタ (uint32_t const) flag_pi / PI 制御実行中フラグ 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	PI 制御実行のフラグを設定
	RM_MOTOR_ESTIMATE_SpeedSet 入力: (motor_angle_ctrl_t * const) p_ctrl / 角度制御構造体ポインタ (float const) speed_ctrl / リファレンス回転速度 (float const) damp_speed / ダンピング回転速度 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	速度情報を設定
	RM_MOTOR_ESTIMATE_CurrentSet 入力: (motor_angle_ctrl_t * const) p_ctrl / 角度制御構造体ポインタ (motor_angle_current_t * const) p_st_current / 電流データ (motor_angle_voltage_reference_t * const) p_st_voltage / 電圧データ 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	d/q 軸の電流データと電圧指令値を設定
	RM_MOTOR_ESTIMATE_AngleSpeedGet 入力: (motor_angle_ctrl_t * const) p_ctrl / 角度制御構造体ポインタ (float * const) p_angle / 角度データ (float * const) p_speed / 速度データ (float * const) p_phase_err / 位相誤差データ 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	ローターの角度と回転速度を取得
	RM_MOTOR_ESTIMATE_EstimatedComponentGet 入力: (motor_angle_ctrl_t * const) p_ctrl / 角度制御構造体ポインタ (float * const) p_ed / 推定 d 軸成分 (float * const) p_eq / 推定 q 軸成分 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	d/q 軸成分の推定値を取得
r_gpt_three_phase.c	R_GPT_THREE_PHASE_DutyCycleSet 入力: (three_phase_ctrl_t * const) p_ctrl / 三相タイマ制御構造体ポインタ (three_phase_duty_cycle_t * const) p_duty_cycle / 設定デューティサイクル 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	各タイマのデューティサイクル設定

表 3-11 速度制御周期割り込み関数内実行関数一覧(1/3)

ファイル名	関数名	処理概要
mtr_main.c	mtr_callback_event0 入力：motor_callback_args_t * p_args / コールバック関数/パラメータデータ 出力：なし	センサレス制御コールバック関数
	mtr_callback_event1 入力：motor_callback_args_t * p_args / コールバック関数/パラメータデータ 出力：なし	センサレス制御コールバック関数
	get_vr1 入力：なし 出力：uint16_t/ 変換値	VR1 の A/D 変換値取得
rm_motor_current.c	RM_MOTOR_CURRENT_ParameterGet 入力：(motor_current_ctrl_t * const) p_ctrl / 電流コントロールブロック (motor_current_input_current_t const * const) p_st_input / インプット電流データ 出力：fsp_err_t / 関数実行結果	電流制御から速度制御入力データを取得
rm_motor_sensorless.c	rm_motor_sensorless_speed_callback 入力：(motor_speed_callback_args_t *) p_args / コールバック関数 パラメータデータ 出力：なし	速度制御コールバック関数
	rm_motor_sensorless_copy_current_speed 入力：(motor_current_output_t *) st_output / 電流出力データ (motor_speed_input_t *) st_input / 速度入力データ 出力：なし	電流出力データを速度入力データにコピー

表 3-12 速度制御周期割り込み関数内実行関数一覧(2/3)

ファイル名	関数名	処理概要
rm_motor_speed.c	rm_motor_speed_cyclic 入力: (timer_callback_args_t *) p_args / コールバック関数パラメータデータ 出力: なし	速度制御の周期動作 (タイマ割り込み時の呼び出し)
	RM_MOTOR_SPEED_ParameterSet 入力: (motor_speed_ctrl_t * const) p_ctrl / モータ速度コントロールブロック (motor_speed_input_t const * const) p_st_input / 速度入力パラメータ 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	速度入力パラメータを設定
	RM_MOTOR_SPEED_SpeedControl 入力: (motor_speed_ctrl_t * const) p_ctrl / モータ速度コントロールブロック 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	d/q 軸電流指令値を計算 (速度制御のメインプロセス)
	rm_motor_speed_set_speed_ref 入力: (motor_speed_instance_ctrl_t *) p_ctrl / モータ速度インスタンス 出力: float / リファレンス速度	速度指令値を更新
	rm_motor_speed_set_iq_ref 入力: (motor_speed_instance_ctrl_t *) p_ctrl / モータ速度インスタンス 出力: float / q 軸リファレンス電流	q 軸の電流指令値を更新
	rm_motor_speed_set_id_ref 入力: (motor_speed_instance_ctrl_t *) p_ctrl / モータ速度インスタンス 出力: float / d 軸リファレンス電流	d 軸の電流指令値を更新
	RM_MOTOR_SPEED_ParameterGet 入力: (motor_speed_ctrl_t * const) p_ctrl / モータ速度コントロールブロック (motor_speed_output_t * const) p_st_output / 速度出力データ 出力: fsp_err_t / 関数実行結果	速度制御の出力パラメータを取得

表 3-13 速度制御周期割り込み関数内実行関数一覧(3/3)

ファイル名	関数名	処理概要
librm_motor_speed.a	rm_motor_speed_first_order_lpf 入力 : (motor_speed_lpf_t *) p_lpf / 一次 LPF 構造体ポインタ (float) f_input / 入力データ 出力 : float / フィルター後のデータ	一次 LPF 処理
	rm_motor_speed_fluxwkn_set_vamax 入力 : (motor_speed_flux_weakening_t *) p_fluxwkn / 弱め磁束構造体ポインタ (float) f4_va_max / 最大電圧ベクトル 出力 : なし	最大電圧ベクトルを設定
	rm_motor_speed_fluxwkn_run 入力 : (motor_speed_flux_weakening_t *) p_fluxwkn / 弱め磁束構造体ポインタ (float) f4_speed_rad / モータ電気速度 (const float *) p_f4_idq / d/q 軸電流 (float *) p_f4_idq_ref / d/q 軸リファレンス電流 出力 : なし	弱め磁束制御実行

3.4 Contents of control

3.4.1 Configuration Options

モータ用センサレスベクトル制御モジュールの構成オプションは、RA Configurator を使用して構成できます。変更されたオプションは、コードの生成時に `hal_data.c/h` に自動的に反映されます。オプション名と設定値を以下の表に記載します。モータ 1 とモータ 2 で設定は変わりません。

表 3-14 Configuration Options (rm_motor_sensorless.h)

オプション名	内容
Limit of over current (A)	相電流がこの値を超えると、PWM 出力ポートがオフに設定されます。
Limit of over voltage (V)	母線電圧がこの値を超えると、PWM 出力ポートがオフに設定されます。
Limit of over speed (rpm)	回転速度がこの値を超えると、PWM 出力ポートがオフに設定されます。
Limit of low voltage (V)	母線電圧がこの値を下回ると、PWM 出力ポートがオフに設定されます。

表 3-15 Configuration Options 初期値 (rm_motor_sensorless.h)

オプション名	RA6T1
Limit of over current (A)	0.42
Limit of over voltage (V)	28.0
Limit of over speed (rpm)	3000.0
Limit of low voltage (V)	14.0

3.4.2 Configuration Options for included modules

モータ用センサレスベクトル制御モジュールには、以下のモジュールが含まれます。

- Current Module
- Speed Module
- Angle Module
- Driver Module

またこれらのモジュールには、センサレスベクトル制御モジュールと同じ構成パラメータがあります。オプション名と設定値を以下の表に示します。

モータ 1、2 でドライバーモジュール以外は設定値に差分は有りません。

表 3-16 電流制御用構成オプション

Configuration Options (rm_motor_current.h)	
オプション名	内容
Shunt type	シャント抵抗をいくつ用いて電流検出を行うかを選択します。
Current control decimation	電流制御間引き回数
PWM carrier frequency (kHz)	PWM キャリア周波数 [kHz]
Input voltage (V)	入力電圧 [V]
Sample delay compensation	サンプル遅延補償の有効/無効を選択します。
Voltage error compensation	電圧誤差補償の有効/無効を選択します。
Voltage error compensation table of voltage 1	電圧の電圧誤差補正テーブル 1
Voltage error compensation table of voltage 2	電圧の電圧誤差補正テーブル 2
Voltage error compensation table of voltage 3	電圧の電圧誤差補正テーブル 3
Voltage error compensation table of voltage 4	電圧の電圧誤差補正テーブル 4
Voltage error compensation table of voltage 5	電圧の電圧誤差補正テーブル 5
Voltage error compensation table of current 1	電流の電圧誤差補正テーブル 1
Voltage error compensation table of current 2	電流の電圧誤差補正テーブル 2
Voltage error compensation table of current 3	電流の電圧誤差補正テーブル 3
Voltage error compensation table of current 4	電流の電圧誤差補正テーブル 4
Voltage error compensation table of current 5	電流の電圧誤差補正テーブル 5
Design Parameter Current PI loop omega	電流制御系固有周波数 [Hz]
Design Parameter Current PI loop zeta	電流制御系減衰係
Motor Parameter Pole pairs	極対数
Motor Parameter Resistance (ohm)	抵抗 [Ω].
Motor Parameter Inductance of d-axis (H)	d 軸インダクタンス [H].
Motor Parameter Inductance of q-axis (H)	q 軸インダクタンス [H].
Motor Parameter Permanent magnetic flux (Wb)	磁束 [Wb].
Motor Parameter Rotor inertia (kgm ²)	イナーシャ [kgm ²].

表 3-17 Configuration Options 初期値 (rm_motor_current.h)

オプション名	RA6T1
Shunt type	2shunt
Current control decimation	1
PWM carrier frequency (kHz)	20.0
Input voltage (V)	24.0
Sample delay compensation	Disable
Voltage error compensation	Enable
Voltage error compensation table of voltage 1	0.672
Voltage error compensation table of voltage 2	0.945
Voltage error compensation table of voltage 3	1.054
Voltage error compensation table of voltage 4	1.109
Voltage error compensation table of voltage 5	1.192
Voltage error compensation table of current 1	0.013
Voltage error compensation table of current 2	0.049
Voltage error compensation table of current 3	0.080
Voltage error compensation table of current 4	0.184
Voltage error compensation table of current 5	0.751
Design Parameter Current PI loop omega	300.0
Design Parameter Current PI loop zeta	1.0
Motor Parameter Pole pairs	2U
Motor Parameter Resistance (ohm)	8.5F
Motor Parameter Inductance of d-axis (H)	0.0045F
Motor Parameter Inductance of q-axis (H)	0.0045F
Motor Parameter Permanent magnetic flux (Wb)	0.02159F
Motor Parameter Rotor inertia (kgm ²)	0.0000028F

表 3-18 速度制御用構成オプション

Configuration Options (rm_motor_speed.h)	
オプション名	内容
Speed control period (sec)	速度制御周期[sec]
Step of speed climbing (rpm)	速度変動のステップ値[rpm]。加速と減速でこの値によって速度を制御します。
Maximum rotational speed (rpm)	最大速度 [rpm]
Speed LPF omega	速度 LPF 固有周波数 [Hz]
Limit of q-axis current (A)	q 軸電流リミット [A]
Step of speed feedback at open-loop	オープンループ時指令速度ステップ(指令速度に対する割合を設定)
Natural frequency	
Open-loop damping	オープンループダンピング制御の選択
Flux weakening	弱め磁束制御の選択
Torque compensation for sensorless transition	センサレス切り替え制御の選択
Speed observer	速度オブザーバ使用の有無を選択します。
Selection of speed observer	速度オブザーバの方式を選択します。
Control method	位置制御時の速度制御方式を選択します。センサレスでは無効です。
Open-Loop Step of d-axis current climbing	d 軸電流指令値加算ステップ [A/msec]
Open-Loop Step of d-axis current descending	d 軸電流指令値減算ステップ [A/msec]
Open-Loop Step of q-axis current descending ratio	q 軸電流指令値減算ステップ [A/msec]
Open-Loop Reference of d-axis current	オープンループ制御時 d 軸電流指令値 [A]
Open-Loop Threshold of speed control descending	d 軸電流指令値減算開始速度[rpm]
Open-Loop Threshold of speed control climbing	d 軸電流指令値加算開始速度 [rpm]
Open-Loop Period between open-loop to BEMF (sec)	センサレス切り替え処理時間 [s]
Open-Loop Phase error(degree) to decide sensor-less switch timing	センサレス制御切り替え可能位相誤差(電気角) [deg]
Design parameter Speed PI loop omega	速度制御系固有周波数 [Hz]
Design parameter Speed PI loop zeta	速度制御系減衰係数
Design parameter Estimated d-axis HPF omega	d 軸誘起電圧 HPF カットオフ周波数 [Hz]
Design parameter Open-loop damping zeta	オープンループダンピング制御減衰係数
Design parameter Cutoff frequency of phase error LPF	位相誤差 LPF カットオフ周波数 [Hz]
Design parameter Speed observer omega	速度オブザーバカットオフ周波数 [Hz]
Design parameter Speed observer zeta	速度オブザーバ減衰係数
Motor Parameter Pole pairs	極対数
Motor Parameter Resistance (ohm)	抵抗 [Ω]
Motor Parameter Inductance of d-axis (H)	d 軸インダクタンス [H]
Motor Parameter Inductance of q-axis (H)	q 軸インダクタンス [H]
Motor Parameter Permanent magnetic flux (Wb)	磁束 [Wb]
Motor Parameter Rotor inertia (kgm ²)	イナーシャ [kgm ²]

表 3-19 Configuration Options 初期値 (rm_motor_speed.h)

オプション名	RA6T1
Speed control period (sec)	0.001
Step of speed climbing (rpm)	0.5
Maximum rotational speed (rpm)	2650.0F
Speed LPF omega	10.0
Speed at Id climbing (rpm)	500.0F
Limit of q-axis current (A)	0.42F
Step of speed feedback at open-loop	0.2F
Open-loop damping	Enable
Flux weakening	Disable
Torque compensation for sensorless transition	Enable
Speed observer	Enable
Selection of speed observer	Disturbance
Open-Loop Step of d-axis current climbing	0.3F
Open-Loop Step of d-axis current descending	0.3F
Open-Loop Step of q-axis current descending ratio	1.0F
Open-Loop Reference of d-axis current	0.3F
Open-Loop Threshold of speed control descending	600.0F
Open-Loop Threshold of speed control climbing	500.0F
Open-Loop Period between open-loop to BEMF (sec)	0.025F
Open-Loop Phase error(degree) to decide sensor-less switch timing	10.0F
Design parameter Speed PI loop omega	5.0F
Design parameter Speed PI loop zeta	1.0F
Design parameter Estimated d-axis HPF omega	2.5F
Design parameter Open-loop damping zeta	1.0F
Design parameter Cutoff frequency of phase error LPF	10.0F
Design parameter Speed observer omega	200.0
Design parameter Speed observer zeta	1.0
Motor Parameter Pole pairs	2U
Motor Parameter Resistance (ohm)	8.5F
Motor Parameter Inductance of d-axis (H)	0.0045F
Motor Parameter Inductance of q-axis (H)	0.0045F
Motor Parameter Permanent magnetic flux (Wb)	0.02159F
Motor Parameter Rotor inertia (kgm ²)	0.0000028F

表 3-20 センサレス向けモータアングルドライバ構成オプション

Configuration Options (rm_motor_estimate.h)	
オプション名	内容
Motor Parameter Pole pairs	極対数
Motor Parameter Resistance (ohm)	抵抗 [ohm]
Motor Parameter Inductance of d-axis (H)	d 軸インダクタンス [H]
Motor Parameter Inductance of q-axis (H)	q 軸インダクタンス [H]
Motor Parameter Permanent magnetic flux (Wb)	磁束 [Wb]
Motor Parameter Rotor inertia (kgm ²)	イナーシャ [kgm ²]
Openloop damping	オープンループダンピング制御の選択
Natural frequency of BEMF observer	誘起電圧推定系固有周波数[Hz]
Damping ratio of BEMF observer	誘起電圧推定系減衰係数
Natural frequency of PLL Speed estimate loop	位置推定系固有周波数[Hz]
Damping ratio of PLL Speed estimate loop	位置推定系減衰係数
Control period	速度制御周期 [sec]

表 3-21 Configuration Options 初期値 (rm_motor_estimate.h)

オプション名	RA6T1
Motor Parameter Pole pairs	2U
Motor Parameter Resistance (ohm)	8.5F
Motor Parameter Inductance of d-axis (H)	0.0045F
Motor Parameter Inductance of q-axis (H)	0.0045F
Motor Parameter Permanent magnetic flux (Wb)	0.02159F
Motor Parameter Rotor inertia (kgm ²)	0.0000028F
Openloop damping	Enable
Natural frequency of BEMF observer	1000.0
Damping ratio of BEMF observer	1.0
Natural frequency of PLL Speed estimate loop	20.0
Damping ratio of PLL Speed estimate loop	1.0
Control period	0.0001

表 3-22 ADC と PWM モジュレーションドライバ構成オプション

Configuration Options (rm_motor_driver.h)	
オプション名	内容
Common Shared ADC support	ADC シェアードモジュール使用選択
Common Supported Motor Number	制御モータ数設定
Shunt type	電流検出方法選択
Modulation method	変調方式選択
PWM output port UP	U 相アッパーアームポート設定
PWM output port UN	U 相ローワーアームポート設定
PWM output port VP	V 相アッパーアームポート設定
PWM output port VN	V 相ローワーアームポート設定
PWM output port WP	W 相アッパーアームポート設定
PWM output port WN	W 相ローワーアームポート設定
PWM timer frequency (MHz)	PWM タイマ周波数 [MHz]
PWM carrier period (Micro seconds)	PWM キャリア周期 [Micro seconds]
Dead time (raw counts)	デッドタイムカウント値 [Raw Counts]
Current range (A)	電流検出レンジ [A]
Voltage range (V)	電圧検出レンジ [V]
Counts for current offset measurement	オフセット取得時積算回数
A/D conversion channel for U phase current	U 相電流検出 A/D チャンネル番号
A/D conversion channel for W phase current	W 相電流検出 A/D チャンネル番号
A/D conversion channel for main line voltage	母線電圧検出 A/D チャンネル番号
A/D conversion channel for V phase current	V 相電流検出 A/D チャンネル番号 2 シャントを選択した場合は無効となります。
A/D conversion unit for U Phase current	U 相電流検出 A/D ユニット番号
A/D conversion unit for W Phase current	W 相電流検出 A/D ユニット番号
A/D conversion unit for main line voltage	母線電圧検出 A/D ユニット番号
A/D conversion unit for V Phase current	V 相電流検出 A/D ユニット番号 2 シャントを選択した場合は向こうとなります。
ADC interrupt module	割り込み発生 ADC モジュール選択
Input voltage	母線電圧入力値
Resolution of A/D conversion	A/D コンバータ分解能
Offset of A/D conversion for current	A/D コンバータ入力オフセット
Conversion level of A/D conversion for voltage	電圧変換レベル
GTIOCA stop level	上アーム停止時レベル
GTIOCB stop level	下アーム停止時レベル
Modulation Maximum duty	PWM 最大デューティ デッドタイムを除いた最大デューティ

表 3-23 Configuration Options 初期値 (rm_motor_driver.h)

オプション名	RA6T1
Common Shared ADC support	Enabled
Common Supported Motor Number	2
Shunt type	2shunt
Modulation method	SVPWM
PWM output port UP	モータ 1 : BSP_IO_PORT_04_PIN_15 モータ 2 : BSP_IO_PORT_01_PIN_15
PWM output port UN	モータ 1 : BSP_IO_PORT_04_PIN_14 モータ 2 : BSP_IO_PORT_06_PIN_08
PWM output port VP	モータ 1 : BSP_IO_PORT_01_PIN_13 モータ 2 : BSP_IO_PORT_06_PIN_09
PWM output port VN	モータ 1 : BSP_IO_PORT_01_PIN_14 モータ 2 : BSP_IO_PORT_06_PIN_10
PWM output port WP	モータ 1 : BSP_IO_PORT_01_PIN_11 モータ 2 : BSP_IO_PORT_06_PIN_01
PWM output port WN	モータ 1 : BSP_IO_PORT_01_PIN_12 モータ 2 : BSP_IO_PORT_06_PIN_00
PWM timer frequency (MHz)	120
PWM carrier period (Micro seconds)	50
Dead time (raw counts)	240
Current range (A)	27.5F
Voltage range (V)	111.0F
Counts for current offset measurement	500U
A/D conversion channel for U phase current	モータ 1 : 0 モータ 2 : 0
A/D conversion channel for W phase current	モータ 1 : 2 モータ 2 : 2
A/D conversion channel for main line voltage	モータ 1 : 5 モータ 2 : 3
A/D conversion channel for V phase current	モータ 1 : 1 モータ 2 : - (無効)
A/D conversion unit for U Phase current	モータ 1 : 0 モータ 2 : 1
A/D conversion unit for W Phase current	モータ 1 : 0 モータ 2 : 1
A/D conversion unit for main line voltage	モータ 1 : 0 モータ 2 : 0
A/D conversion unit for V Phase current	モータ 1 : 0 モータ 2 : - (無効)
ADC interrupt module	モータ 1 : 1st モータ 2 : 2nd
Input voltage	24.0
Resolution of A/D conversion	0xFFFF
Offset of A/D conversion for current	0x7FF
Conversion level of A/D conversion for voltage	1.0
GTIOCA stop level	Pin Level Low
GTIOCB stop level	Pin Level High
Maximum duty	0.9375

3.5 制御フロー（フローチャート）

3.5.1 メイン処理

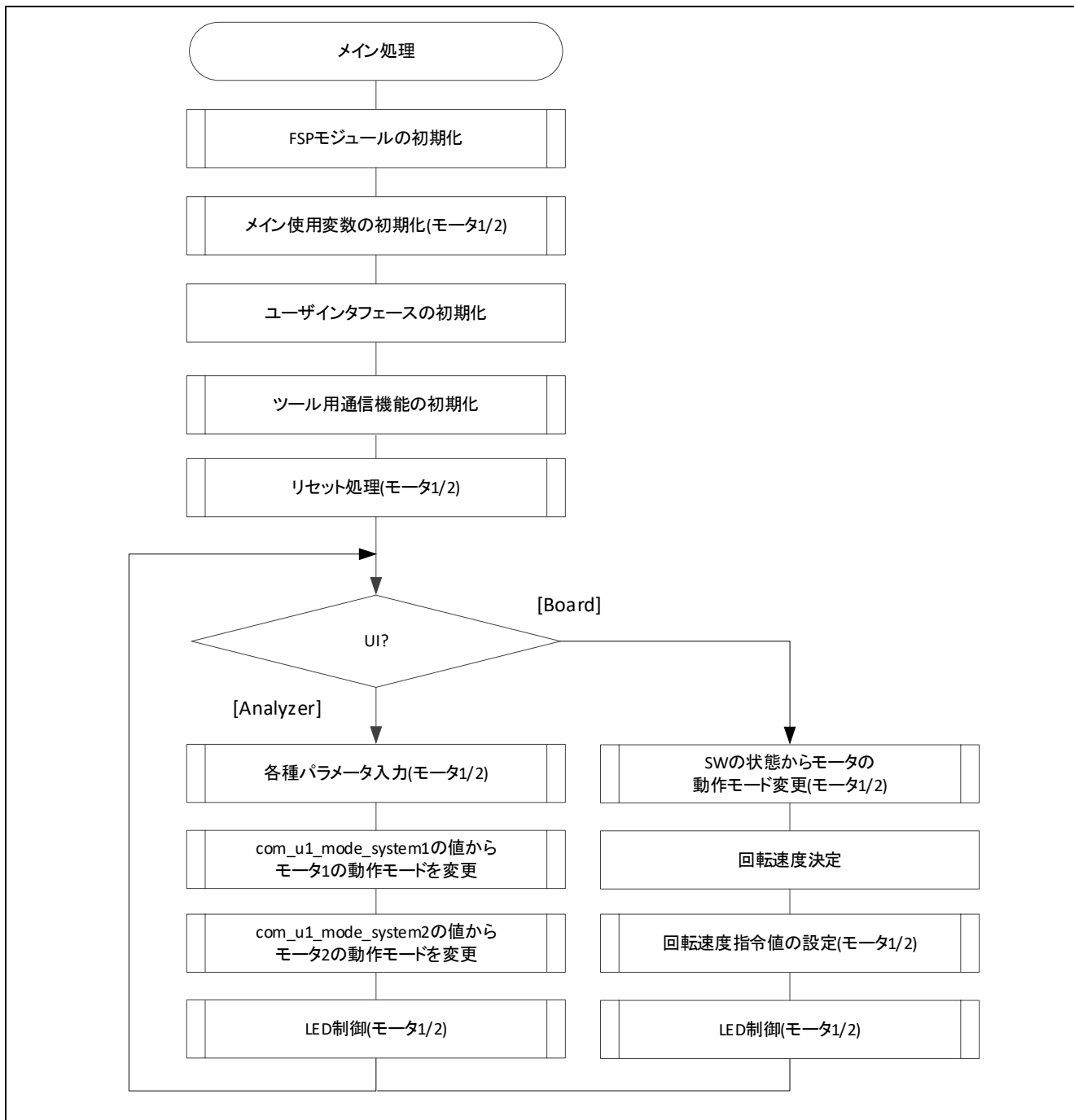


図 3-6 メイン処理フローチャート

3.5.2 電流制御周期割り込み（キャリア同期割り込み）処理

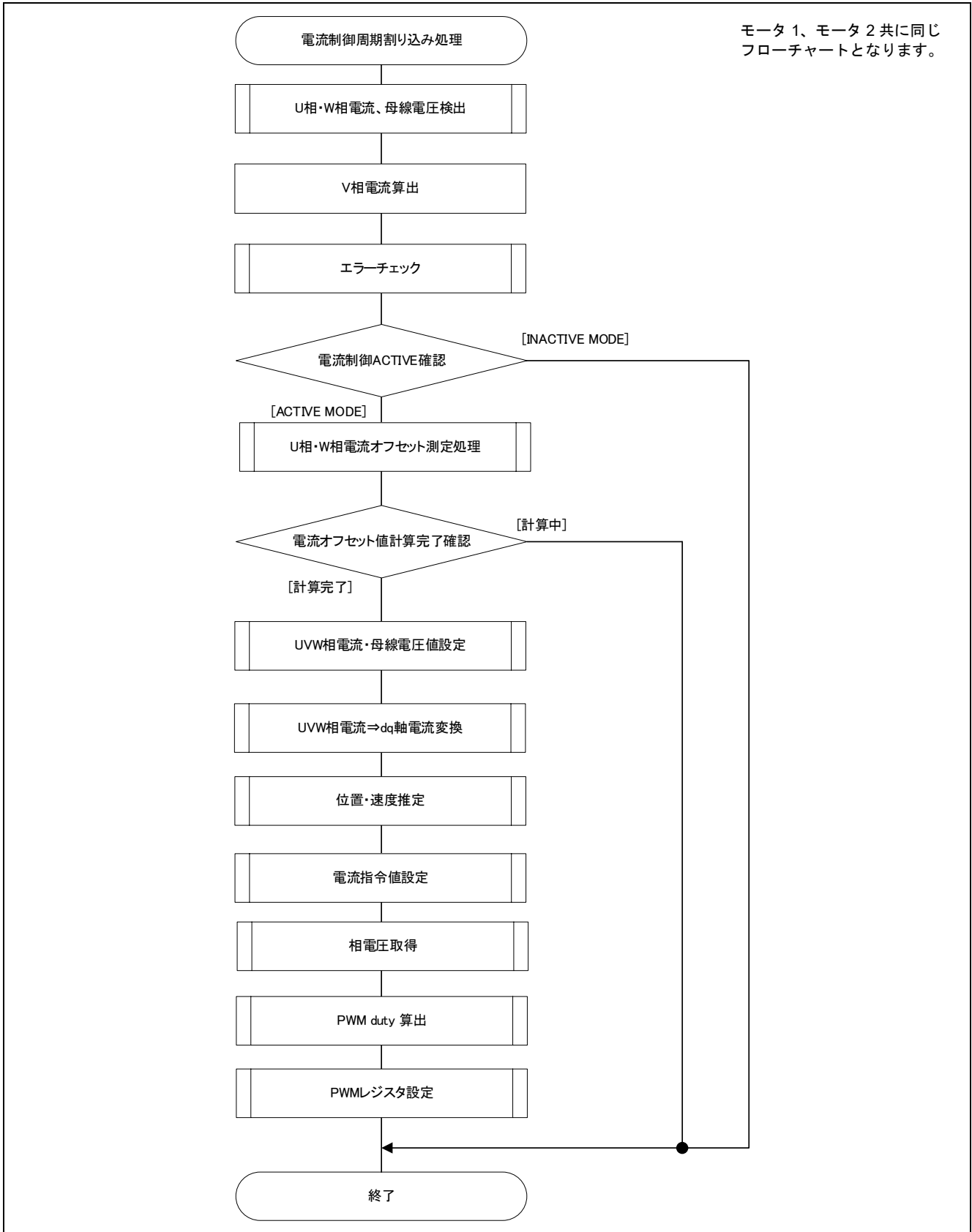
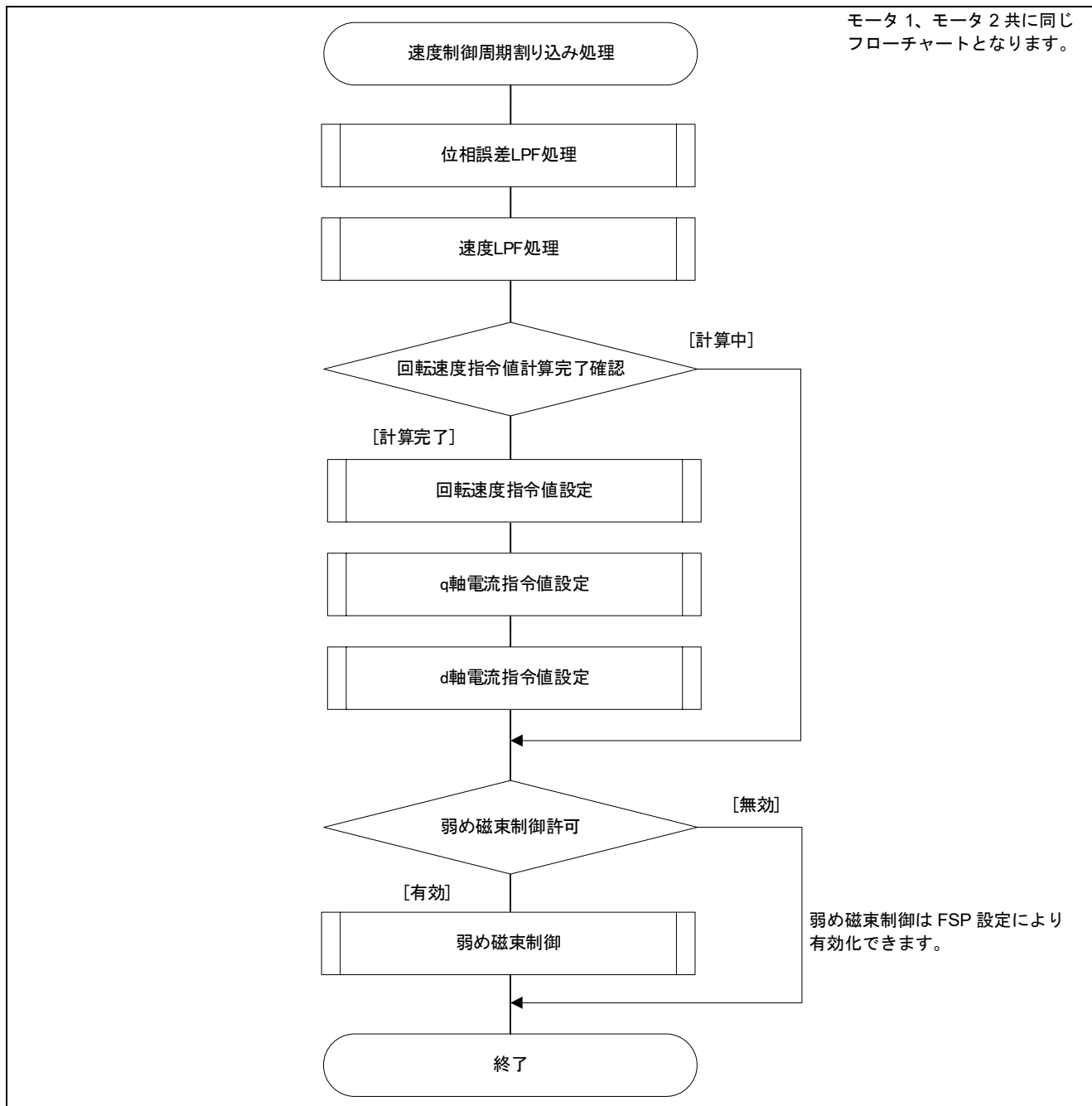


図 3-7 電流制御周期割り込み処理フローチャート

3.5.3 速度制御周期割り込み処理



3.5.4 過電流検出割り込み処理

過電流検出割り込みは、サンプルソフトウェアにおける PWM 出力端子のハイインピーダンス制御条件で発生する割り込みです。そのため、本割り込み処理の実行開始時点では既に PWM 出力端子はハイインピーダンス状態になっており、モータへの出力は停止しています。

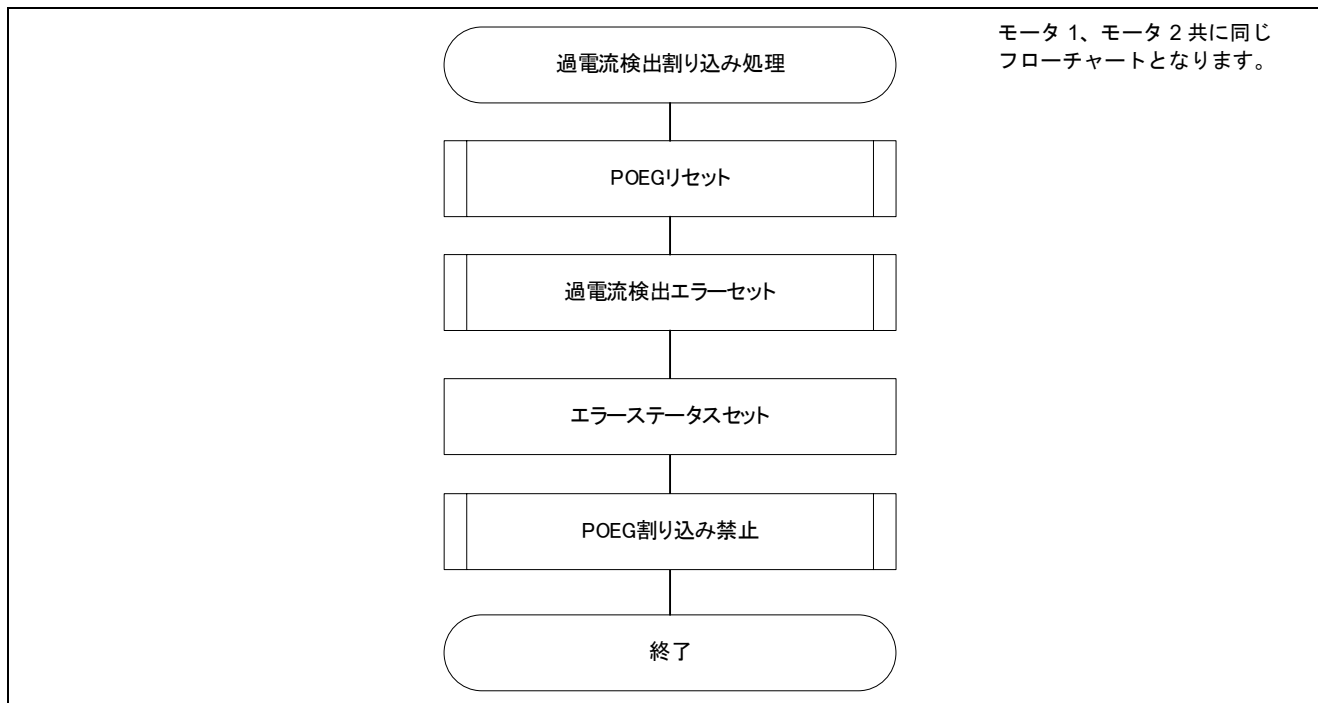


図 3-9 過電流検出割り込み処理フローチャート

4. サンプルソフトウェアの操作概要

サンプルソフトウェアの操作について説明します。

4.1 クイックスタート

モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」を使用せずにサンプルコードを動作させる場合、下記の手順を実行します。

- (1) 安定化電源投入後、またはリセット後はインバータボード上の LED1_1、LED1_2、LED2_1、LED2_2 はすべて消灯状態で、モータは停止しています。
- (2) 各インバータボード上のトグルスイッチ(SW1_1,SW1_2)を ON にするとモータが回転します。トグルスイッチ(SW1_1,SW1_2)を切り替えるごとにモータの回転開始/停止を繰り返します。モータが正常に回転している場合はインバータボード上の LED1_1、LED1_2 が点灯します。このとき、インバータボード上の LED2_1、LED2_2 が点灯している場合はエラーが発生しています。
- (3) モータの回転方向を変更する場合は、インバータボード上のボリューム抵抗(VR)で調整します。
 - ボリューム抵抗(VR)を右に回す：モータが時計回りに回転
 - ボリューム抵抗(VR)を左に回す：モータが反時計回りに回転
- (4) エラーが発生した場合、インバータボード上の LED2_1 または LED2_2 が点灯し、回転が停止します。復帰するためにはエラーが発生した方のインバータボードのトグルスイッチ(SW1_1 または SW1_2)を OFF にした上でエラーが発生した方のプッシュスイッチ(SW2_1,SW2_2)を押してください。
- (5) 動作確認を終了する場合は、モータの回転が停止していることを確認し、安定化電源の出力を OFF にします。

4.2 モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」

4.2.1 概要

サンプルソフトウェアでは、モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」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。使用方法などの詳細は「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル」を参照してください。

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。

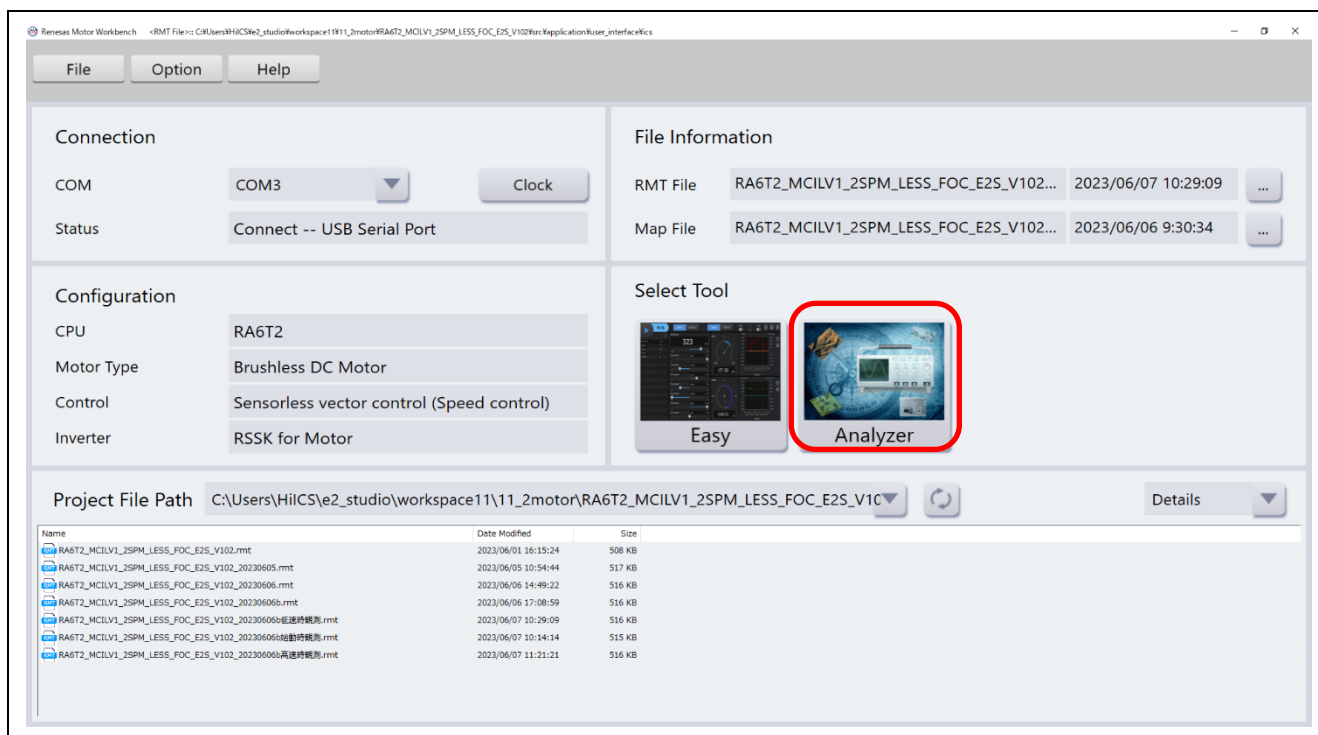



図 4-1 Renesas Motor Workbench 外観

- モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」の使い方



- (1) ツールアイコン  をクリックしツールを起動します。
- (2) Main Window の MENU バーから、[File] → [Open RMT File(O)]を選択します。
プロジェクトフォルダの“src/application/user_interface/ics”フォルダ内にある RMT ファイルを読み込みます。
- (3) “Connection”の COM で接続されたキットの COM を選択します。
- (4) 右側の Select Tool の Analyzer ボタンをクリックし、Analyzer 機能を起動します。
- (5) “4.2.3 Analyzer 機能操作例”を基にモータを駆動します。

4.2.2 Analyzer 機能用変数一覧

Analyzer ユーザインタフェース使用時の入力用変数一覧を表 4-1 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対応する変数へ反映されます。ただし、(*)が付けられた変数は com_u1_enable_write に依存しません。

変数名の末尾に"1"が付いている変数はモータ 1 制御用です。モータ 2 を制御する場合は、変数名の末尾に"2"が付いている変数を使用してください。表 4-1 には、"1"及び"2"を付けずに記載しています。

表 4-1 Analyzer 機能入力用変数一覧

変数名	型	内容
com_u1_sw_userif (*)	uint8_t	ユーザインタフェーススイッチ 0 : Analyzer 使用 1 : ボード使用 (デフォルト)
com_u1_mode_system (*)	uint8_t	ステート管理 0 : ストップモード、1 : ランモード、3 : リセット
com_f4_ref_speed_rpm	float	速度指令値 (機械角) [rpm]
com_u2_mtr_pp	uint16_t	極対数
com_f4_mtr_r	float	抵抗 [Ω]
com_f4_mtr_ld	float	d 軸インダクタンス [H]
com_f4_mtr_lq	float	q 軸インダクタンス [H]
com_f4_mtr_m	float	磁束 [Wb]
com_f4_mtr_j	float	イナーシャ [kgm^2]
com_f4_current_omega	float	電流制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_current_zeta	float	電流制御系減衰係数
com_f4_speed_omega	float	速度制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_speed_zeta	float	速度制御系減衰係数
com_f4_e_obs_omega	float	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_e_obs_zeta	float	誘起電圧推定系減衰係数
com_f4_pll_est_omega	float	位置推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_pll_est_zeta	float	位置推定系減衰係数
com_f4_ref_id	float	オープンループ制御時 d 軸電流指令値 [A]
com_f4_ol_id_up_step	float	d 軸電流指令値加算ステップ
com_f4_ol_id_down_step	float	d 軸電流指令値減算ステップ
com_f4_id_down_speed_rpm	float	d 軸電流指令値減算開始速度(機械角) [rpm]
com_f4_id_up_speed_rpm	float	d 軸電流指令値加算開始速度(機械角) [rpm]
com_f4_max_speed_rpm	float	速度最大値(機械角) [rpm]
com_f4_overspeed_limit_rpm	float	速度超過エラー閾値(機械角) [rpm]
com_f4_overcurrent_limit	float	電流超過エラー閾値[A]
com_f4_iq_limit	float	q 軸電流最大値[A]
com_f4_limit_speed_change	float	速度指令最大増減幅(電気角) [rad/s]
com_u1_enable_write	uint8_t	変数書き換え許可 (g_u1_enable_write と同じ値を書き込んだ場合に書き込み許可)

4.2.3 Analyzer 機能操作例

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、図 4-2 で示す“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。

変数名の末尾に数字が付いていない変数はモータ 1 制御用です。モータ 2 を制御する場合は、変数名の末尾に“1”が付いている変数を使用してください。以下の操作例は、モータ 1 制御用変数のみで記載していません。

- ユーザーインターフェースを Analyzer 使用に変更する
 - (1) “com_u1_sw_userif”の[W?]欄に“チェック”が入っていることを確認します。
 - (2) [Write]欄に 0 を入力します。
 - (3) “Write”ボタンをクリックします。
- モータを回転させる
 - (1) “com_u1_mode_system”, “com_f4_ref_speed_rpm”, “com_u1_enable_write”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。
 - (4) “Read”ボタンを押して現在の“com_f4_ref_speed_rpm”, “g_u1_enable_write”の [Read] 欄を確認します。
 - (5) MCU 内の変数値へ反映させるため、“com_u1_enable_write” に④で確認した“g_u1_enable_write”と同じ値を入力します。
 - (6) “com_u1_mode_system”の [Write]欄に“1”を入力します。
 - (7) “Write”ボタンをクリックします。

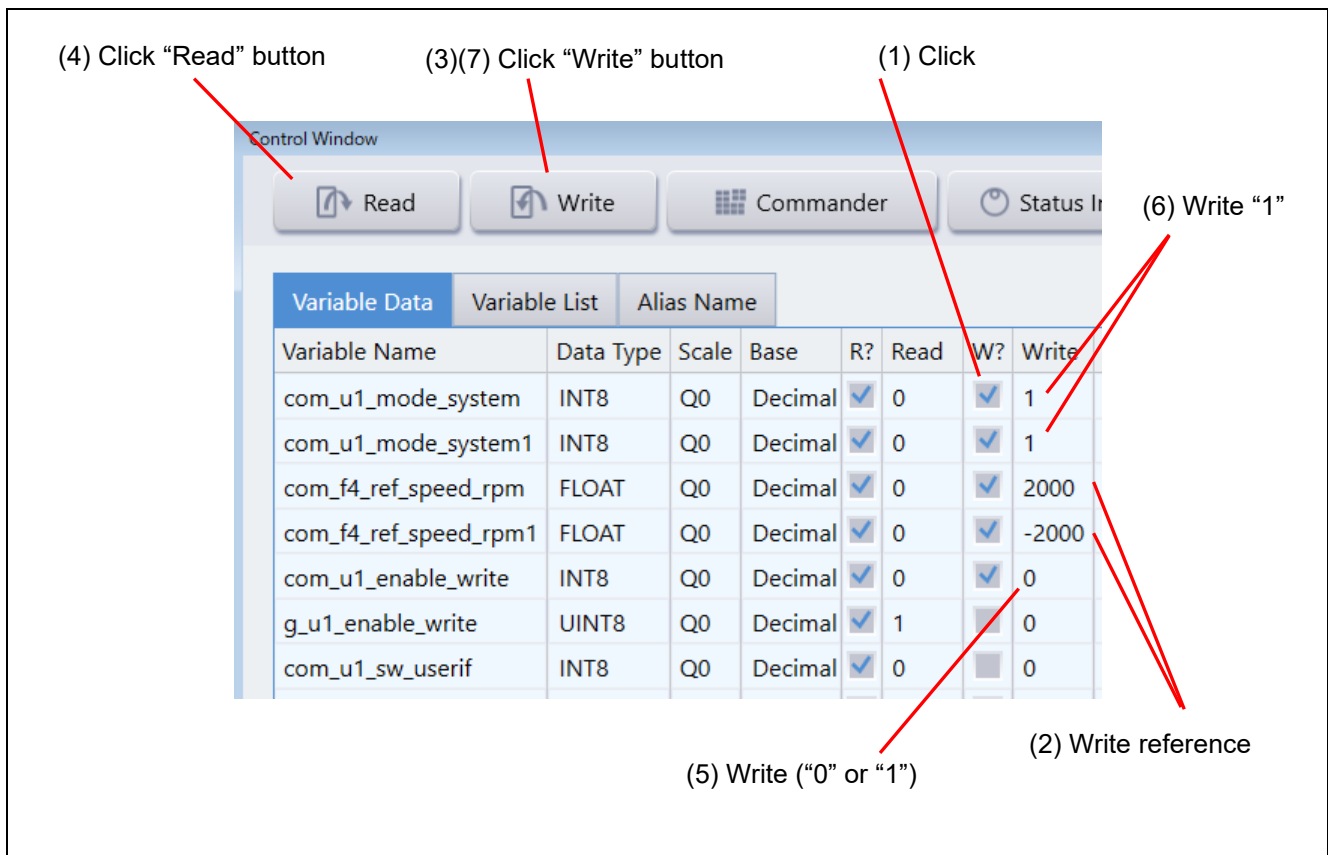


図 4-2 モータ回転の手順

- モータを停止させる
 - "com_u1_mode_system"の[Write]欄に"0"を入力します。
 - "Write"ボタンをクリックします。

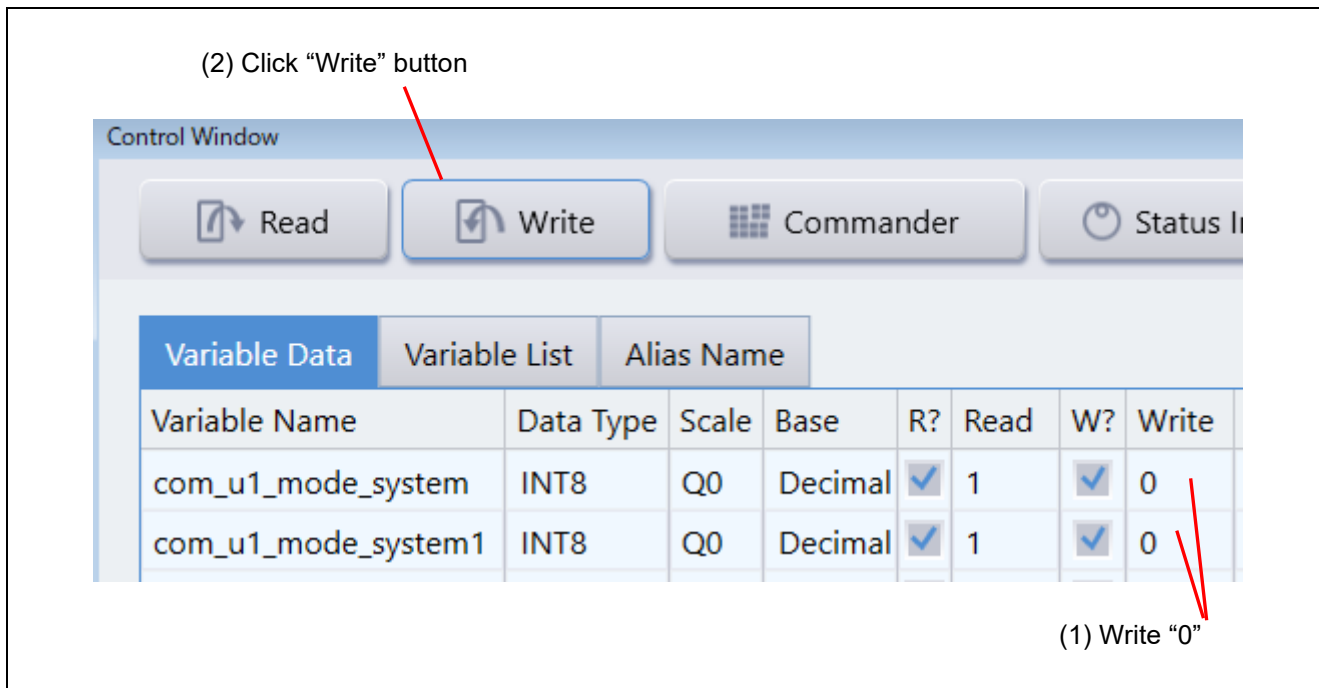


図 4-3 モータ停止の手順

- 止まってしまった（エラー）場合の処理
 - “com_u1_mode_system”の[Write]欄に“3”を入力します。
 - “Write”ボタンをクリックします。

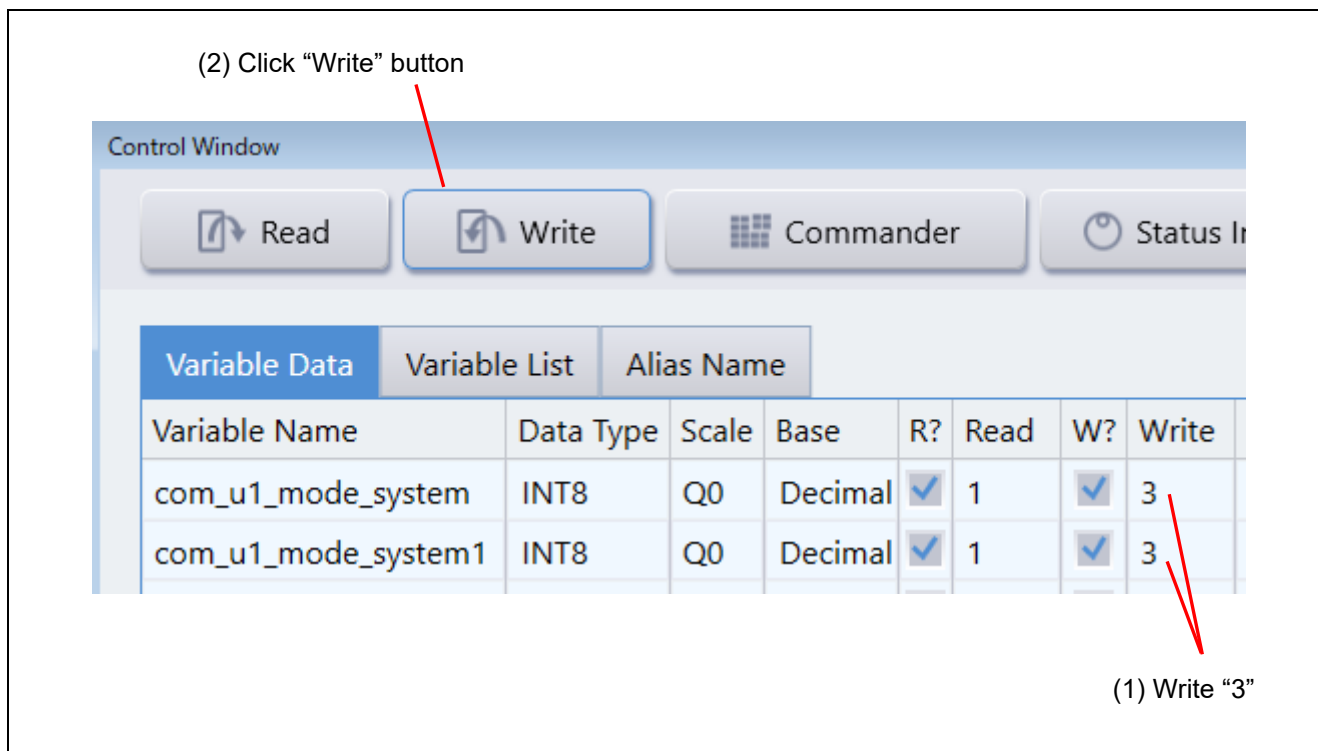


図 4-4 エラー解除の手順

4.2.4 通信速度の変更例

サンプルソフトウェアで Renesas Motor Workbench の通信速度を変更する手順を示します。変更する値については、「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル」を参照してください。

- サンプルソフトウェアの通信速度設定を変更する(通信レート 10Mbps の場合)
 - ① r_mtr_ics.h の ICS_BRR の値を 1 に変更する
 - ② r_mtr_ics.h の MTR_ICS_DECIMATION の値を 1 に変更する

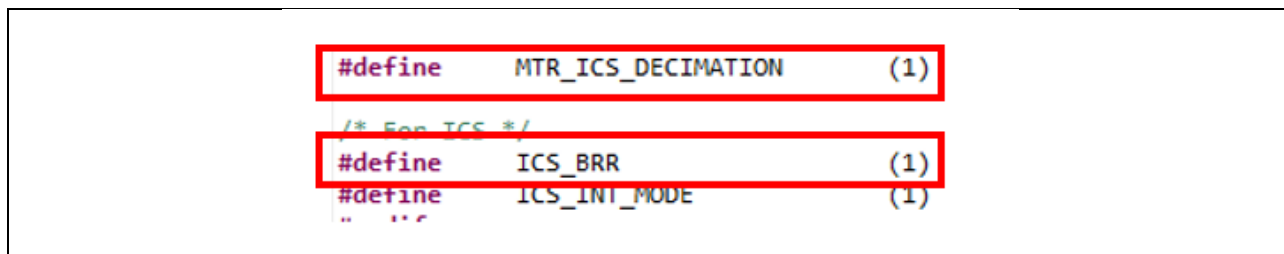


図 4-5 r_mtr_ics.h の修正

- Renesas Motor Workbench の通信速度設定を変更して接続する
 - ① Main Window の Clock ボタンを押して値を 80,000,000 に変更する
(この値は通信レートを 1Mbps から 10Mbps に変更したため、デフォルト値の 8,000,000 を 10 倍して得られます。)
 - ② Connection の COM で接続中のキットの COM を選択する

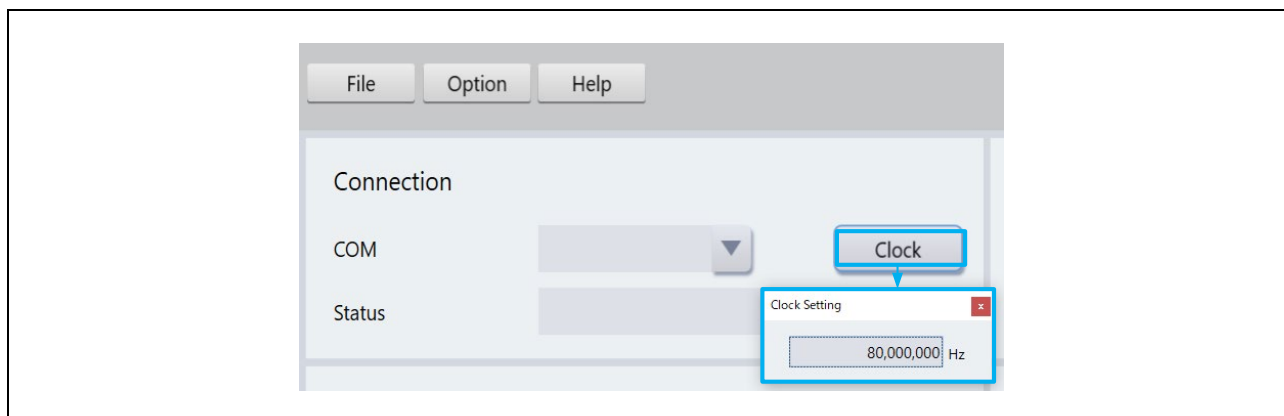


図 4-6 Clock 周波数の設定

接続に失敗する場合は、通信ボードのリセット後に再接続する手順を繰り返してください。

5. 参考ドキュメント

- RA6T1 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編 (R01UH0897)
- Renesas Flexible Software Package (FSP) User's Manual
(PDF 版 : R11UM0155, Web 版 : RA Flexible Software Package Documentation)
- 統合開発環境 e2studio 2022-07 以上 ユーザーズマニュアル クイックスタートガイド (R20UT5210)
- 永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 (アルゴリズム編) (R01AN3786)
- Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル (R21UZ0004)
- Renesas Motor Workbench クイックスタートガイド (R21QS0011)
- Motor Control Evaluation System for RA Family (R12UZ0078)
- RA6T1 CPU カード ユーザーズマニュアル (R12UZ0077)

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2021.8.30	-	初版発行
1.01	2022.10.18	-	FSP V4.1.0 をサポート
1.10	2023.8.30	-	<ul style="list-style-type: none">• Evaluation System for BLDC Motor シリーズ用に更新• FSP V4.6.0 rm_motor_driver モジュールの Dual Motor 対応をサポート

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イやマガジンケース、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しないでください。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、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えば、フラッシュメモリ、レイアウトパターンなどの相違などにより、電気的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ輻射量などが異なる場合があります。型名が違う製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

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うにあたり、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、海中中継器、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た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したします。
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。