

ホワイトペーパー

産業機器のマルチモーター制御開発を短縮

花田 雅之、IoT・インフラ事業本部、ルネサス エレクトロニクス株式会社

川尻 洋之、IoT・インフラ事業本部、ルネサス エレクトロニクス株式会社

2020 年 10 月

概要

昨今のモータを使用するシステムは、高性能化の一途をたどっております。性能があがると同時に BOM コストの問題が出てきております。また産業機器でも故障に伴う安全性の実現が課題であり、機能安全(IEC61508)対応が急務となっておりますが、開発コストの増大が開発者の頭を悩ます要因となっております。

今回の提案では、上記の課題に対し、デバイスとソリューションの両輪で如何に解決出来るかを紹介させていただきます。紹介内容は、以下になります。

- モータ制御向けデバイスの紹介
複数のモータ制御を1マイコンで実現出来る RX ファミリの
モータ制御向け ASSP マイコン(RX66T/RX72T シリーズ)
- モータ制御開発ソリューションの紹介
 - ・ Evaluation System for BLDC Motor
永久磁石同期モータ(ブラシレス DC モータ)を容易に評価できるインバータボードを主にしたキット
 - ・ モータ制御アプリケーションノート
モータ制御に必要な知識と、評価を容易にするソースコードを含んだ実装手法の説明
 - ・ Renesas Motor Workbench 2.0
開発時間短縮に貢献する強力な開発ツール
- 産業機器向け機能安全ソリューション
機能安全認証プロセスを大幅に削減し、開発負荷を軽減するソリューション



モータ制御開発で以下のお困り事はありませんか？

- ① BOM コスト削減の為に、複数のモータ制御を1つのマイコンで実現したい。
- ② 複数モータ制御の実現に向けて簡単に開発環境を構築したい。
- ③ 安全性向上の為に、機能安全(IEC61508)に対応したシステムを開発したい。

これらお困り事に対し、解決する方法を各々以下に順次説明します。

① 複数のモータ制御を実現するマイコンについて

複数のモータ制御を1つのマイコンで実現する為には、以下の通りいくつかのハードルを越えなくてはなりません。

- A. 三相相補PWM出力タイマが駆動モータ数分なければ、そもそも複数のモータを制御出来ません。
- B. 複数のモータを制御する為には、駆動モータ数分の CPU 処理能力(演算能力)が必要になります。
- C. 複数のモータを制御する為の、フィードバック機能(位置検出)が必要になります。フィードバックは、1～3shunt 方式、レゾルバ方式、エンコーダ方式があり、各々A/D コンバータ、位相計数機能が複数必要になります。

これら、A.B.C.機能を満たすマイコンが RX ファミリのモータ制御向け ASSP マイコン(RX66T/RX72T シリーズ)になり、以下図 1 の通り、1つのマイコンでシステムを構築する事が出来ます。

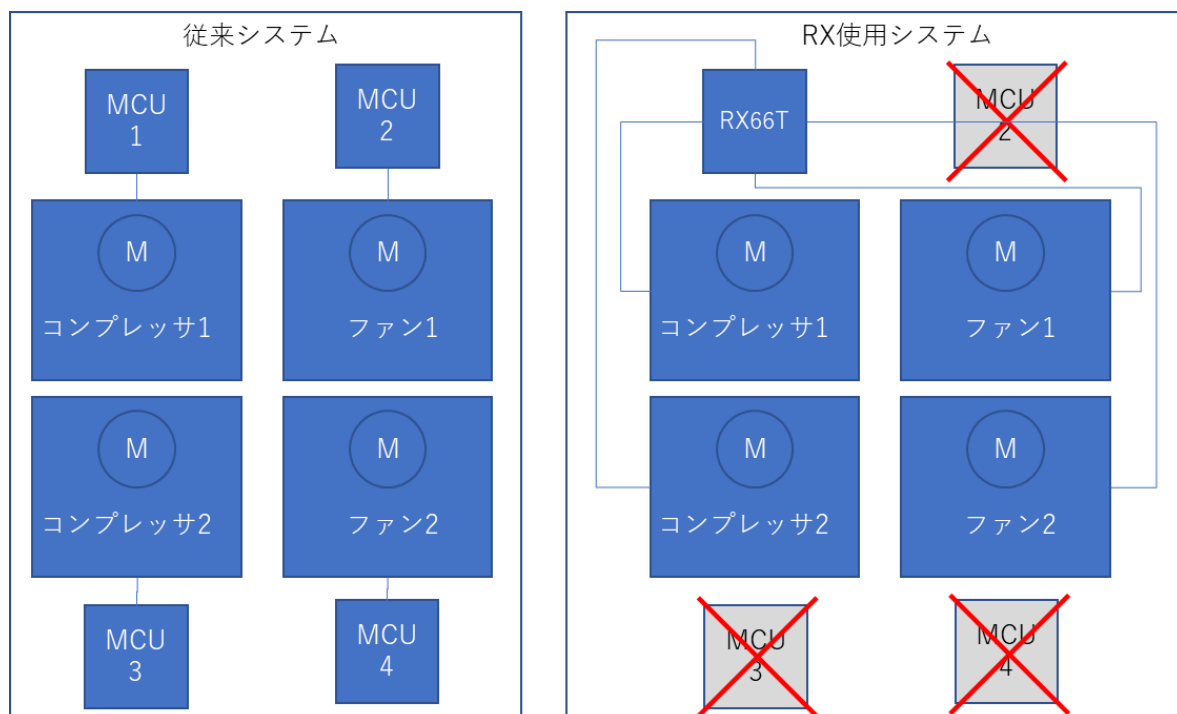


図 1. 従来システムと RX 使用システムの比較

次に複数のモータを制御出来る特長ある機能を以下に説明します。

A.三相相補 PWM タイマについて

RX66T/RX72T シリーズで三相相補 PWM 出力する機能は、以下図 2 の MTU3 タイマ、GPTW タイマがあり、各々複数の三相相補 PWM 出力が可能なタイマです。本タイマには複数の三相相補 PWM を出力する際のソフトウェア負荷を少なくする特長ある機能を搭載しております。以下に各々説明します。

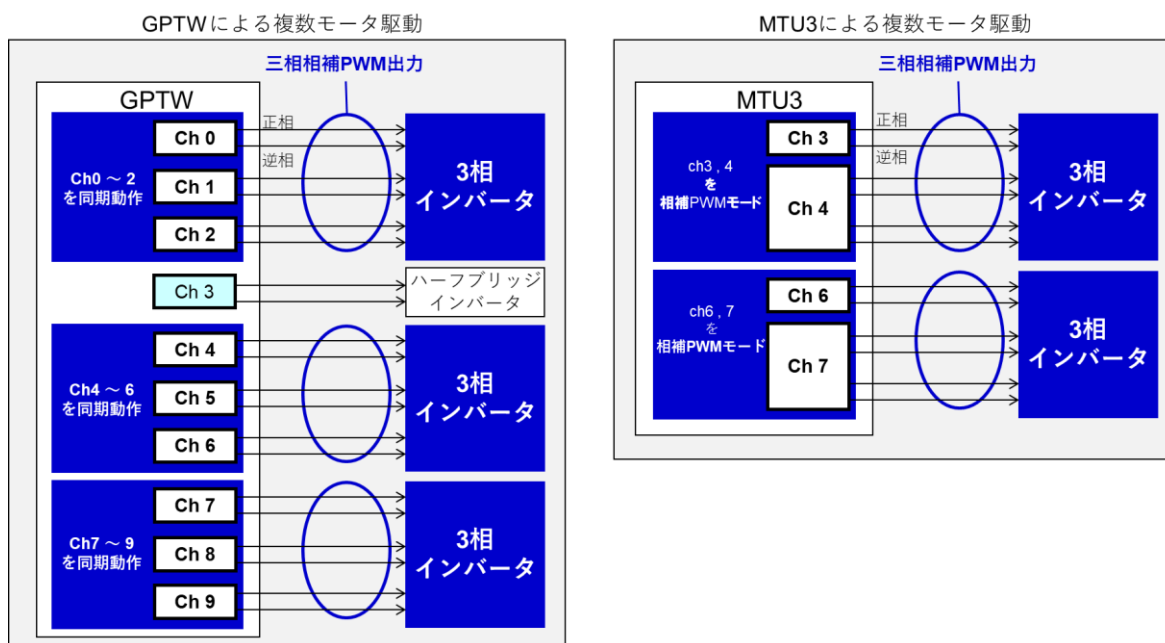


図 2. 三相相補 PWM タイマ本数

・三相相補 PWM タイマ特長 その 1(ダブルバッファ機能)

アップダウンカウンタのアップカウント用、ダウンカウント用のバッファレジスタにより、1shunt 制御時の電流検出などで必要な左右非対称相補 PWM が出来、かつ割り込み回数を半減(ソフトウェア介入を 50%削減)する事が可能です。ソフトウェア介入が減る事で、時間のかかるモータ制御演算に CPU リソースを多く使用する事が出来ます。複数のモータ制御に最適な機能としております。

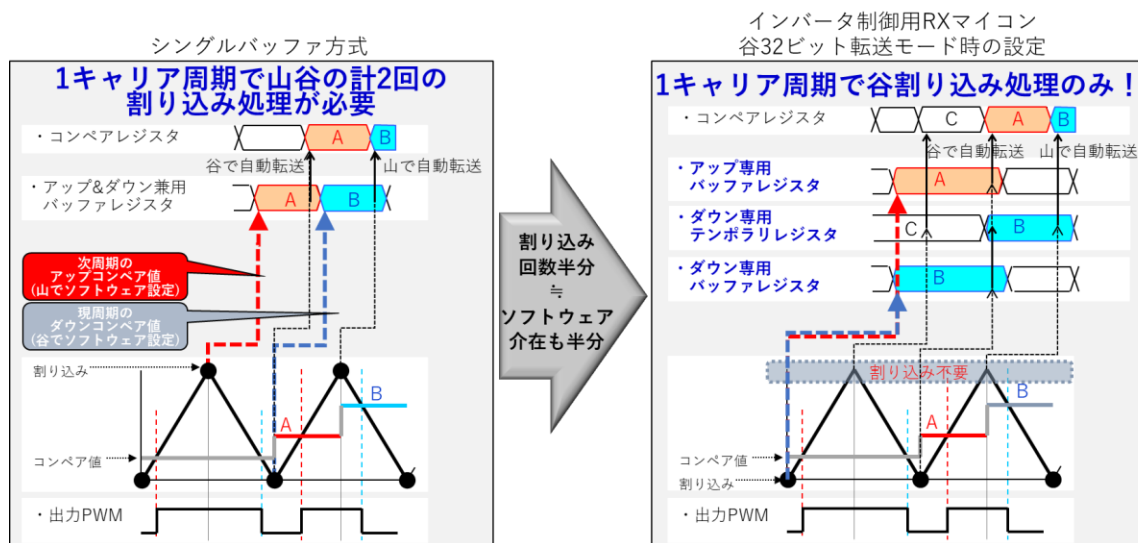


図 3. 三相相補 PWM タイマのダブルバッファ機能

・ 三相相補 PWM タイマ特長 その 2(間引き機能(割込み & A/D 変換))

複数のモータを制御する際に、処理が間に合わない等が発生する可能性があります。従来は、割込み時にソフトウェアで間引いておりましたが、割込みのオーバーヘッドと CPU 介入による計算中断などが問題となっておりました。また、A/D 変換結果を破棄する場合でも A/D 変換は実施する為、A/D 変換中に他で使いたい場合は待機となる問題がありました。これに対し間引き機能では、割込み及び A/D 変換開始トリガ各々に独自の間引き用カウンタを持っており、間引きカウンタを設定するのみで、不要な割込みと A/D 変換開始トリガを自動的に削減する事が出来ます。CPU リソースを使わずに処理出来る為、複数のモータ制御に最適な機能です。

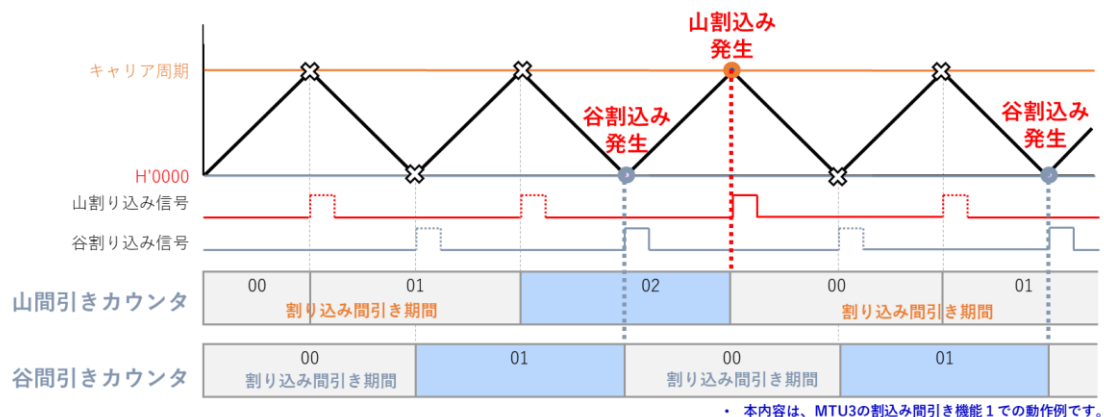


図 4. 三相相補 PWM タイマの割込み間引き機能

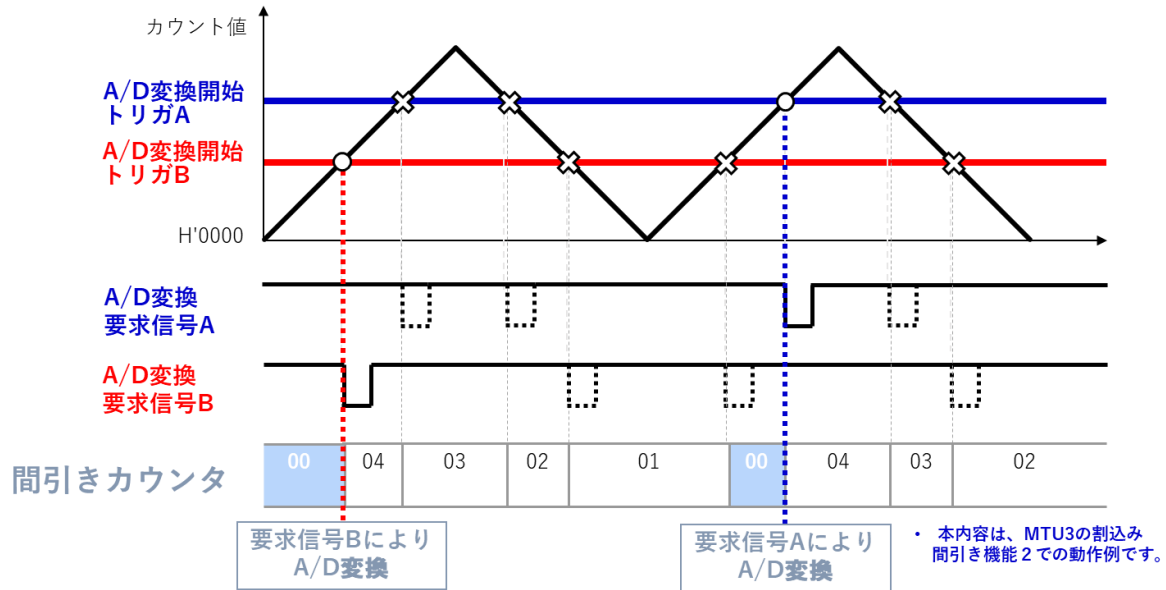


図 5. 三相相補 PWM タイマの A/D 変換間引き機能

・三相相補 PWM タイマ特長 その3(PWM 出力保護機能)

モータ制御で必須となるフェールセーフ機能が PWM 出力保護機能です。モータ制御時に問題が発生した場合、迅速にモータ駆動を停止する機能であり、RX66T/RX72T シリーズは複数のモータ駆動を個別に強制遮断出来ます。

- ✓ 各種条件にてソフトウェア介在無しに GPT や MTU3 の出力を停止させることができます。
- ✓ タイマの動作状態に関係なく停止でき、強固なフェールセーフの実現に貢献します。
- ✓ タイマ出力の遮断だけでなく、汎用 I/O への切替えも可能です。
- ✓ 異常電圧検出時(コンパレータによる検出)は、正常復帰すると自動的に強制遮断を解除します。

トリガ要因	トリガ内容
POE#入力端子	Lowエッジ検出時 or Lowサンプリングによるレベル検出時
発振停止	メインクロック発振器の発振停止を検出時
相補PWM出力レベル比較	正相/逆相出力が同時アクティブの時
コンパレータ検出	コンパレータ出力検出時
ソフトウェア	レジスタ書き込みで制御した時

表 1. 三相相補 PWM 出力保護機能のトリガ要因

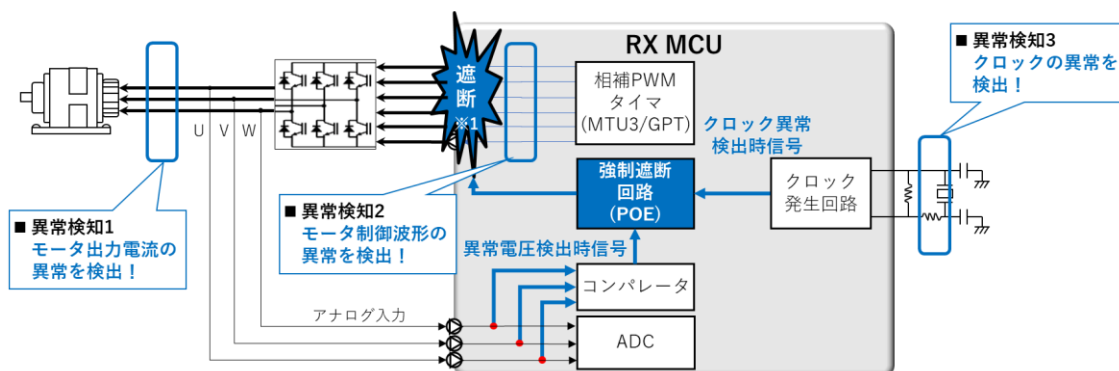


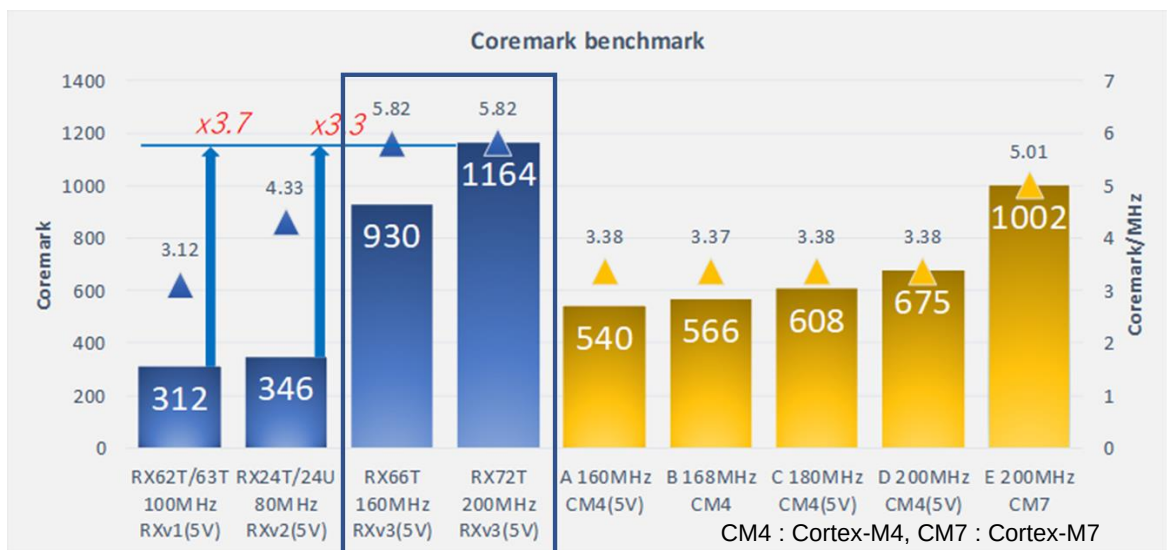
図 6. 三相相補 PWM 出力保護機能

B.演算能力について

・CPU 能力

他社を凌駕する CPU 性能により、複数のモータ制御演算を円滑に実施できます。RX66T/RX72T シリーズは、最新の RXv3 コアを搭載した事で RX72T@200MHz では、RX62T@100MHz に対し周波数以上の性能アップを実現しております。RX66T は、同一周波数の他社 ARM コアマイコン (Cortex-M4(CM4)) @160MHz に対し、約 1.7 倍の性能を発揮します。これにより、動作周波数を上げずに他社マイコンと同等の性能を発揮出来ますので、低消費電力化にも貢献出来ます。

- ✓ RX72T 最大 1160CoreMark は、RX62T に対し 3.7 倍、RX24T/U に対し 3.3 倍、同周波数帯他社製品を凌駕
- ✓ 5V 対応製品としては最高レベルの性能で、システムの高性能化・高機能化・応答性向上に貢献

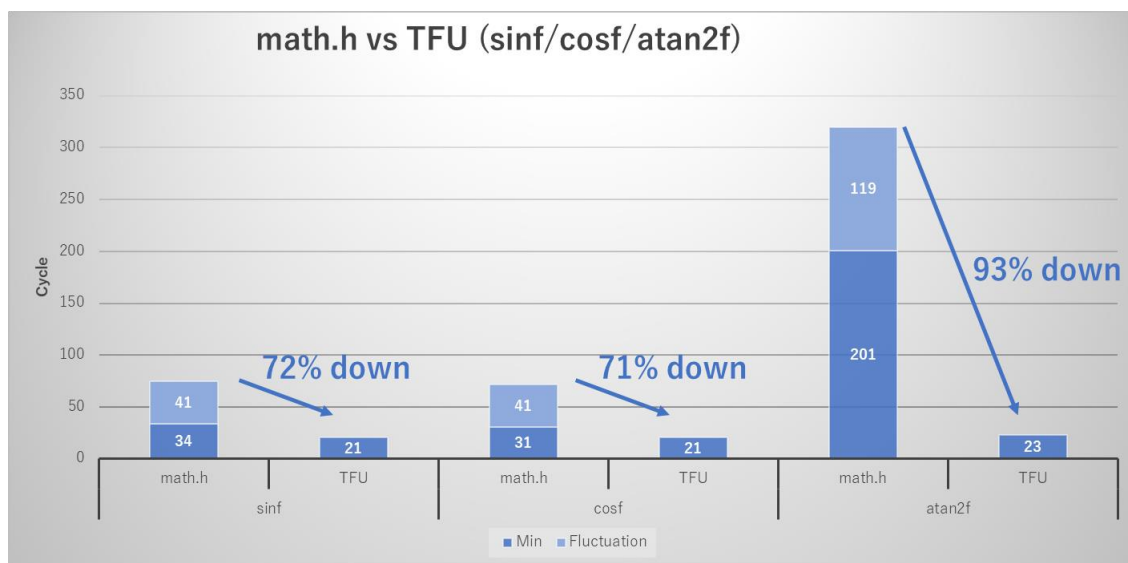


*EEMBC /各メーカー公称値より参照

図 7. コアマーク ベンチマーク比較

・三角関数アクセラレータ(TFU)

RX72T には、ベクトル制御を行う上で必要となる三角関数演算を高速に実行する三角関数アクセラレータを搭載しています。TFU 使用時の処理時間削減効果は標準ライブラリの math.h に対し sin 関数は最大 72%、cos 関数は最大 71%、atan 関数は最大 93%の削減と CPU 処理を大幅に減らす事が出来るため、複数のモータ制御にも十分耐えられるパフォーマンスを発揮出来ます。



本結果は CC-RX V3.01 の実測による参考値です。
入力値については代表値であり網羅しているものではありません。

図 8. TFU の効果 math.h vs TFU

・レジスタ一括退避機能

複数のモータ制御では多くの割り込み処理を実施する為、割り込みハンドラ処理が大きな負荷となります。RX72T 搭載のレジスタ一括退避機能を使用する事で割り込みハンドラ処理時間を 50% 以上に大幅低減出来ます。

例：割り込みハンドラのレジスタ退避/復帰

■ 従来のソフトウェア処理*

- 退避：(退避レジスタ数) cycle
- 復帰：(復帰レジスタ数) cycle

C ソース：
#pragma interrupt
handler
void handler(void){
...
...
...
}

出力コード：
_handler:
PUSHM R14-R15 } 7cycle*
PUSHM R1-R5 }
...
...
...
POPM R1-R5 } 7cycle*
POPM R14-R15 }
RTE

通常 退避/復帰を必要とするレジスタが増加すると処理サイクルも増加

*退避/復帰を必要とするレジスタ数はハンドラ構成に依存します

APN：RX72T グループ レジスタ一括退避機能の使用法(R01AN4436) もご覧ください

■ RXv3 レジスタ一括退避機能**

- 退避：1 cycle
- 復帰：3~6 cycle

C ソース：
#pragma interrupt
handler(bank=3)
void handler(void){
...
...
...
}

出力コード：
_handler:
SAVE #03H} 1cycle
...
...
...
RSTR #03H} 3~6cycle
RTE

高速退避により
実際の割り込み処理プログラム
実行までの応答性を向上

**本記述はCC-RXコンパイラにおけるイメージです。

図 9. レジスタ一括退避機能の効果 従来マイコン vs RX72T

C.フィードバック機能(A/D コンバータ,エンコーダ)について

RX66T/RX72T シリーズは、複数のモータフィードバック情報を取得する機能を搭載しております。特に A/D コンバータは、最大 3unit 搭載し、3shunt 方式向けの 3ch 同時サンプル&ホールドが出来るチャネル専用サンプル&ホールド機能を最大 2unit 搭載しており、従来のスキャン変換と比べ、電流取得ポイントのずれがなくソフトウェアでの補正処理をなくす事が出来ます。ま

た、1shunt 方式向けには2つの変換トリガで各々トリガに対する変換結果を保持出来るデータ二重化レジスタを搭載しており、一つのアナログ経路で2箇所の変換が出来ます。これによりボード設計が容易になり、かつオーバーヘッドが発生する割込みを削減出来ます。その他、シャント電流などを取得するために疑似作動入力型オペアンプを 6ch 搭載しております。従来のシングルエンドタイプでは共通ノイズの影響を受けやすく、かつ外付け回路構成が複雑になりますが、疑似作動入力型オペアンプではこのような問題が解決出来、外部オペアンプの削減につながります。

エンコーダ機能は、各種エンコーダ出力に対応したモードを搭載しており、外部回路で変換をかけずに直接マイコンに取り込む事が出来ますので、柔軟なシステム構築が出来ます。

・A/D コンバータ機能

従来製品から各アナログ機能をブラッシュアップ！さらに使い勝手が向上しています！

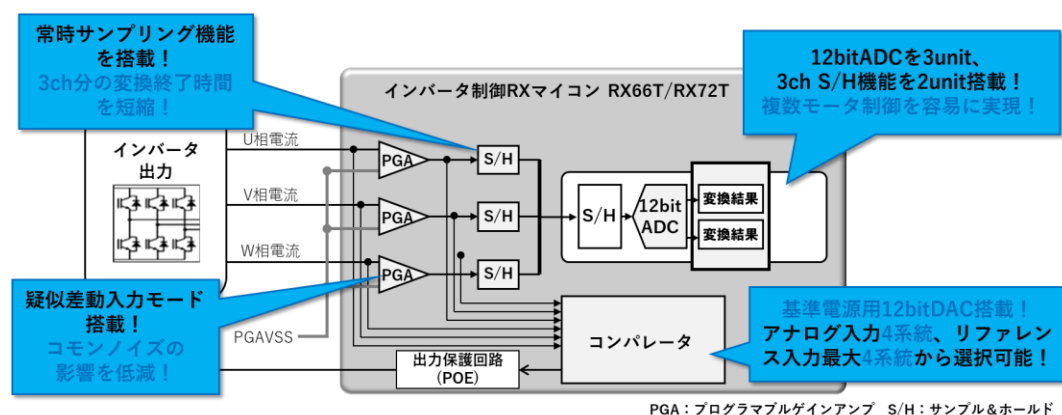


図 10. RX66T/RX72T シリーズ搭載 A/D コンバータの特長

・エンコーダ機能

パルス列入力/2 相エンコーダの計測に最適な位相計数モードを 5 モード搭載しており様々なパルス入力およびエンコーダ入力に対応しております。

位相計数モードは、位相差のある2本のパルス信号を MTCLKA(MTCLKC, GTIOCnA)、MTCLKB(MTCLKD, GTIOCnB)端子に入力し、エッジ数をカウント(加算/減算)する機能です。

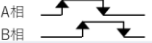
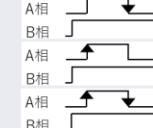
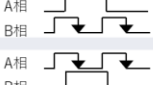
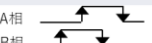
カウント 方向	モード1		モード2		モード3		モード4		モード5 ¹⁾	
	カウント 条件	カウント エッジ	カウント 条件	カウント エッジ	カウント 条件	カウント エッジ	カウント 条件	カウント エッジ	カウント 条件	カウント エッジ
加算 (正回転)	位相 A相 > B相	A相、B相 各々の 立上り/立下り	B相がHigh	A相の立下り	B相がHigh	A相の立下り	位相 A相 > B相	B相の 立上り/立下り	A相がHigh/Low	B相の立下り
				A相の立上り		A相の立上り			B相がHigh/Low	A相の立下り
	A相の両エッジ	A相の両エッジ								
										
減算 (逆回転)	位相 A相 < B相	A相、B相 各々の 立上り/立下り	B相がLow	A相の立下り	A相がHigh	B相の立下り	位相 A相 < B相	B相の 立上り/立下り	なし	なし
				A相の立上り		B相の立上り				
	A相の両エッジ	B相の両エッジ								
								なし		

図 11. RX66T/RX72T シリーズ搭載 エンコーダ機能の特長

② 開発環境の構築について

システムの開発には、仕様検討からテストまで、様々なプロセスを経ます。仕様検討プロセスでは、システムを実現する上で必要となる機能の洗い出しとして、マイコンに必要な機能が搭載されているか、性能を満たせるかなど検討します。ルネサスが提供するアプリケーションノートは、モータ制御に必要な情報を全て提供しておりますので、この検討時間を短縮出来ます。次にソフトウェアの開発プロセスでは、ソフトウェアを開発する為のハードウェアプラットフォームの構築(ボード開発)が必要になりますが、ルネサスではハードウェアプラットフォームとして使用出来るソリューション(Evaluation System for BLDC Motor)を提供しており、かつハードウェアを新規で開発する場合においても提供している回路情報をリファレンスとしてご使用出来ます。また、ソフトウェア開発では動作の可視化が開発効率の決め手になります。従来はお客様側で専用ツール(RAM モニタなど)を構築しておりましたが、ルネサスは、そのツールの代わりになる Renesas Motor Workbench 2.0(RAM モニタ、パラメータ変更、波形表示)を提供しております。この様に、ルネサスでは、開発プロセス毎に必要なソリューションを取り揃えており、システム開発を迅速に、かつ短期間で効率よく、そして低コストで実現出来ます。

◆Evaluation System for BLDC Motor

永久磁石同期モータ(ブラシレス DC モータ)を容易に評価できるインバータボードを主にしたキットです。キットに含まれるボード、モータや Web からダウンロードできるソフトウェアを用いて、キット購入後すぐに評価を始めることができます。本キットはリファレンス、プラットフォームとして使用出来るハードウェアです。

キット特長

- ・ 48V/5A に対応、購入後直ぐに評価可能
- ・ CPU カードを変更する事で各種マイコンの評価が可能
- ・ 2 モータ制御に対応(キットは 2 台必要)

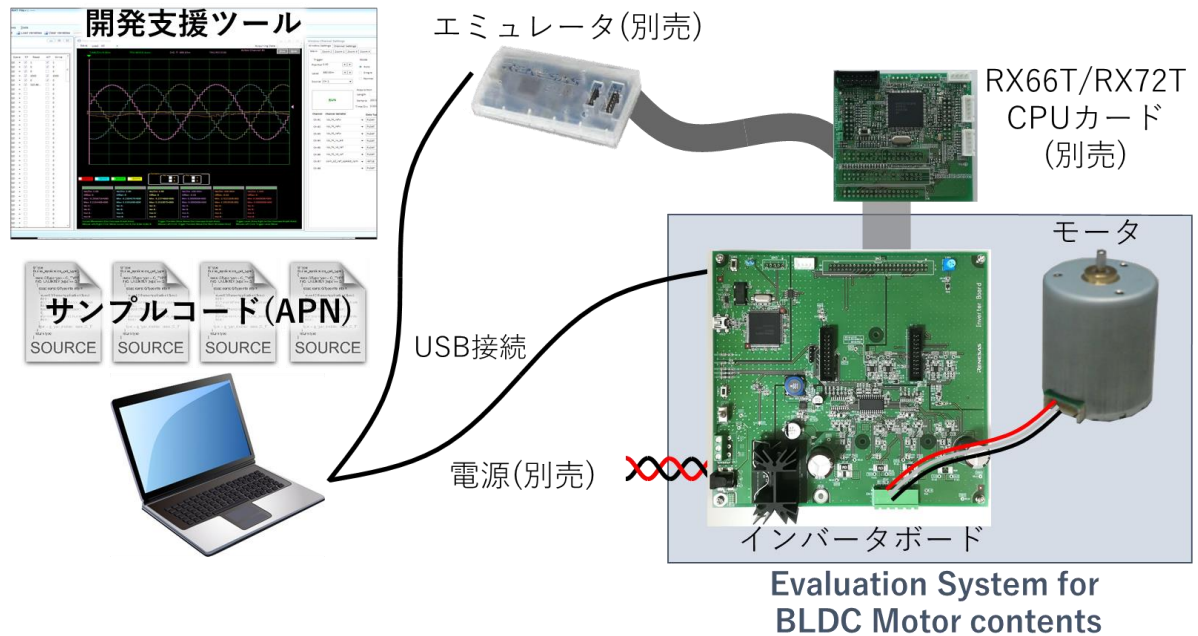


図 12. Evaluation System for BLDC Motor の構成

◆モータ制御アプリケーションノートについて

システム機能を実現する上で必要となるアルゴリズム解説、各種機能のサンプルコード、及び実装ガイダンスなどを取り揃えており、モータ制御に必要な知識と、容易に評価できるソースコードを提供しております。

特長

- 120 度通電制御やベクトル制御(ホールセンサ、エンコーダ、センサレス)のソフトウェアをマイコン毎に完備
- それぞれのアプリケーションノートで制御を解説
- モータ制御初心者でも扱えるソフトとしてモータ制御開発支援ツール Renesas Motor Workbench に対応
- モータ制御のレジスタの初期設定確認にも最適
- RX66T/RX72T シリーズのソフトは三相相補 PWM の出力を MTU3 と GPTW から選択可能
- RX72T のソフトは三角関数演算器(TFU)を使ってベクトル制御を高速に処理

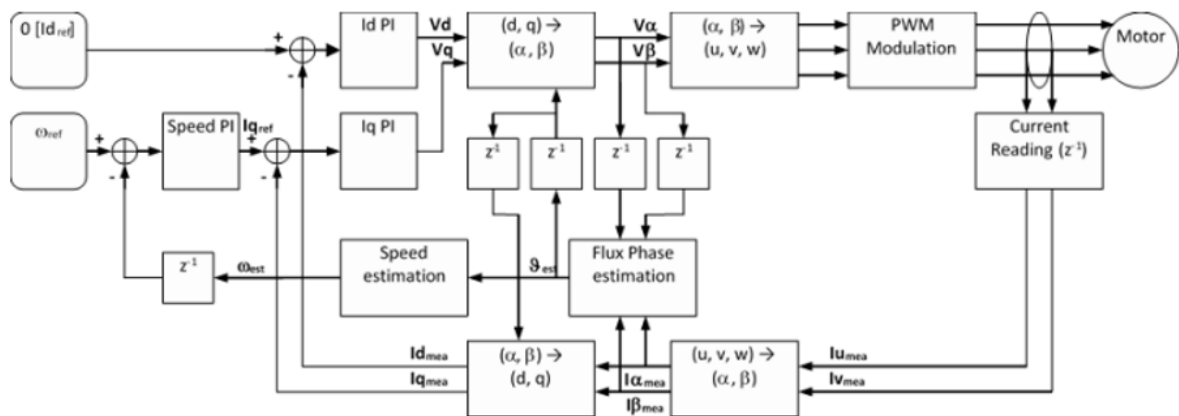


図 13. FOC アルゴリズムの構成

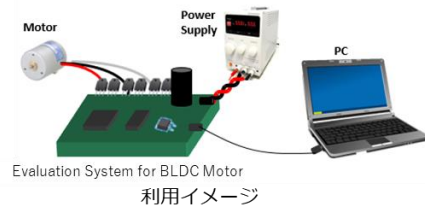
提供物		Target MCU	提供方法	有償/無償
ソフトウェア(モータ制御ソフトウェア&アプリケーションノート)				
エンコーダを利用したベクトル制御 (CS+版, e2studio版)		RX23T, RX24T, RX24U, RX66T, RX72T	Webから ダウン ロード	無償
関連資料	アプリケーションノート-アルゴリズム編			
	アプリケーションノート-実装編			
センサレスベクトル制御 (CS+版, e2studio版)		RX13T, RX23T, RX24T, RX24U, RX66T, RX72T		
関連資料	アプリケーションノート-アルゴリズム編			
	アプリケーションノート-実装編			
センサレス120度通電制御(CS+版, e2studio版)		RX23T, RX24T		
関連資料	アプリケーションノート-アルゴリズム編			
	アプリケーションノート-実装編			
ホールセンサを利用した120度通電制御 (CS+版, e2studio版)				
関連資料	アプリケーションノート-アルゴリズム編			
	アプリケーションノート-実装編			

表 2. アプリケーションノート一覧

◆Renesas Motor Workbench 2.0(RMW)

RMW は、簡単にユーザプロジェクトに組み込み、専用のハードウェアを必要としないソフトツールです。従来の開発手法では、マイコン内部変数(A/D 変換結果など)をシリアル通信などで外部に出力し制御状態を確認後、モータのパラメータ修正、プログラムの変更 & コンパイルを実施させ動作評価するサイクルを繰り返しておりました。RMW では、プログラム修正 & コンパイルをせず、モータを動作させながら変数の動的な読み書きと変数の波形表示、及びオシロスコープと同様に波形表示データを出力する機能を備えておりますので、開発時間を大幅に削減出来ます。また、ノウハウが必要だったベクトル制御に必要なモータパラメータや制御ゲインを自動同定する機能を備えており、かつ同定結果を pdf ファイルやヘッダファイルとして出力出来ます。RMW はお客様の開発時間を大幅に削減する強力な開発ツールです。

Renesas Motor Workbench はターゲットのインバータと接続したPC上で動作
モータ制御開発を強力にサポート



Analyzer



トリガ、ズーム、コマンド送信等機能も豊富でデバッグや評価に便利。ユーザI/Fとしても利用可能。

Tuner

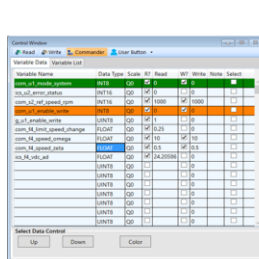


ノウハウ不要で誰でも簡単にベクトル制御を実現。マニュアル調整機能も備えており、微調整も簡単、結果もすぐに確認可能。

図 14. Renesas Motor Workbench 2.0 の特長

➤ Analyzer 機能

- ・モータを駆動させながら動的に変数の読み書きが可能
- ・モータを駆動させながら動的に変数の波形表示が可能
- ・波形表示はトリガ設定や各種表示設定が可能
- ・任意の変数に対し、予め動作シーケンスを作成し、送信する事が可能
- ・ユーザが定義して使えるバッチ処理ボタンも装備



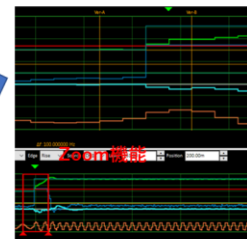
任意の変数を自由に読み書き
デバッグや評価に便利

ユーザI/Fとしても利用可能



8ch分の変数を表示(それぞれスケールやオフセット等を設定可能)

コマンド(指令値作成&送信)機能
を使えばStep応答評価も簡単



トリガ機能、ズーム機能
もあるので解析も簡単

図 15. Renesas Motor Workbench 2.0 の Analyzer 機能

➤ Tuner 機能

- ・モータ固有パラメータ(抵抗、インダクタンス、誘起電圧定数、イナーシャ)を自動測定
- ・電流、速度、位置の PI 制御ゲインを自動調整
- ・センサレスベクトル制御用の推定ゲイン等も自動調整
- ・各 PI 制御を手動チューニングで微調整可能
- ・結果を pdf ファイルや駆動 S/W のヘッダファイルとして出力可能

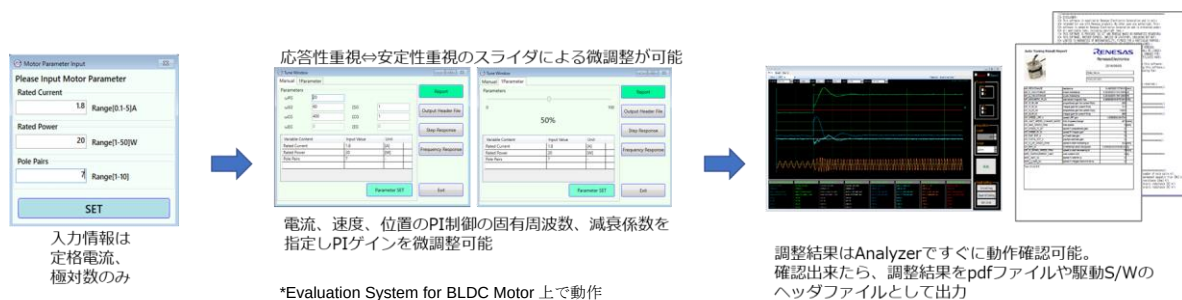


図 16. Renesas Motor Workbench 2.0 の Tuner 機能

➤ Renesas Motor Workbench 2.0 (RMW)の実装方法

RMW を使用する為に、ユーザプログラム側で設定する内容は、以下の軽微な変更のみです。

A. ユーザプログラムの変更

- DTC 設定 使用 RAM 領域の設定
- 割り込み設定 SCI の TX,RX の割り込み設定
- メイン処理で「ics2_init」初期化関数をコール
- 指定割り込み処理で「ics2_watchpoint」データ転送関数をコール

B. RMW 通信ライブラリをユーザプログラムと一緒にコンパイル

```
#include "ics_RX23T.h"
#pragma section DTCTBL
unsigned long dtc_table[256]; // caution alignment 0x000
#pragma section
void main (void)
{
    ics2_init ( (void*) dtc_table, port, level, speed, mode);
}
```

```
void int_TM100u (void) /* 100usec 間隔 */
{
    if (3 <= g_u1_cnt_decimation) /* decimation of ICS call */
    {
        g_u1_cnt_decimation = 0;
        ics2_watchpoint (); /* data transfer */
    }
    g_u1_cnt_decimation++;
}
```

③ 産業機器向け機能安全(IEC61508)について

IEC61508 認証取得には、多くの時間とコストがかかります。開発開始から認証取得までのプロセスに対し、以下の通り、様々な作業を実施する必要があります。ルネサスは本作業を低減する手段として、マイコンに安全機能を搭載し、認証プロセスの短縮に向けた「産業機器向け機能安全ソリューション」を展開しております。ルネサスは、この両輪でお客様開発をサポートします。

SIL認証取得プロセス

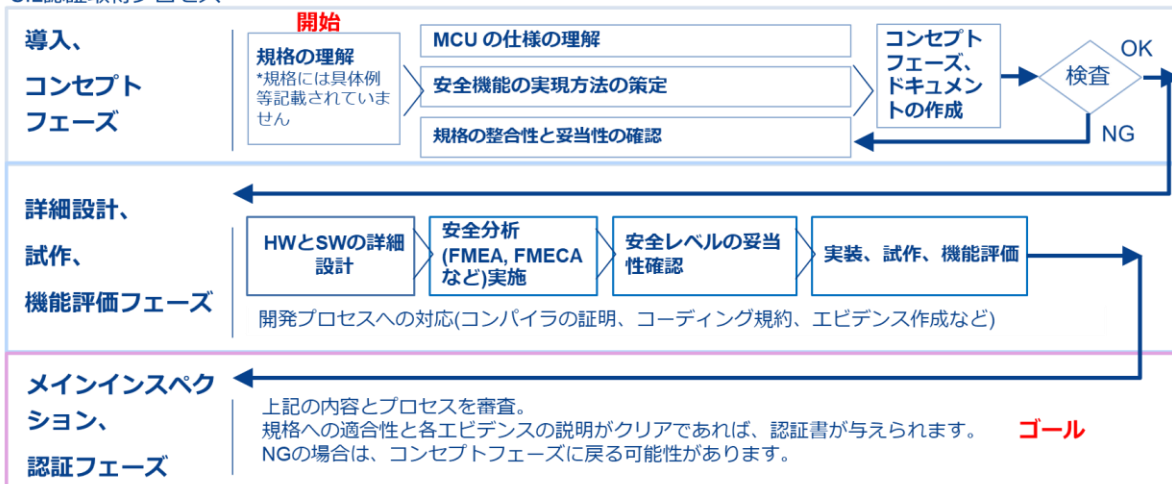


図 17. 機能安全対応 SIL 認証取得プロセス

◆産業機器向け機能安全ソリューションの適用開発

機能安全を適用したシステムの開発をゼロベースで始めると、大幅なコスト増加につながります。ルネサスは、機能安全認証プロセスを大幅に削減出来る「産業機器向け機能安全ソリューション」を提供しており、以下の通り、産業機器における機能安全システムの開発負荷を、大幅に軽減します。

ルネサスの機能安全に関する取り組み、ソリューションの詳細は、[ホワイトペーパー](#)も合わせて参照下さい。詳しく、産業機器向け機能安全の [WEB ページ](#)をご覧ください。

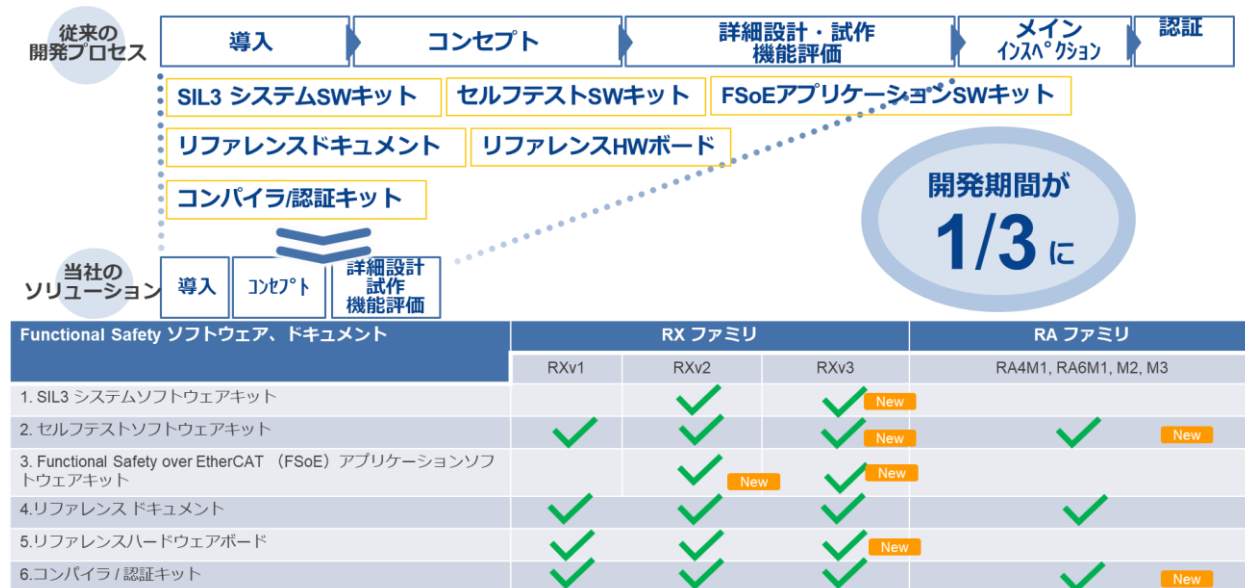


図 18. ルネサスの産業機器向け機能安全ソリューション 適用効果

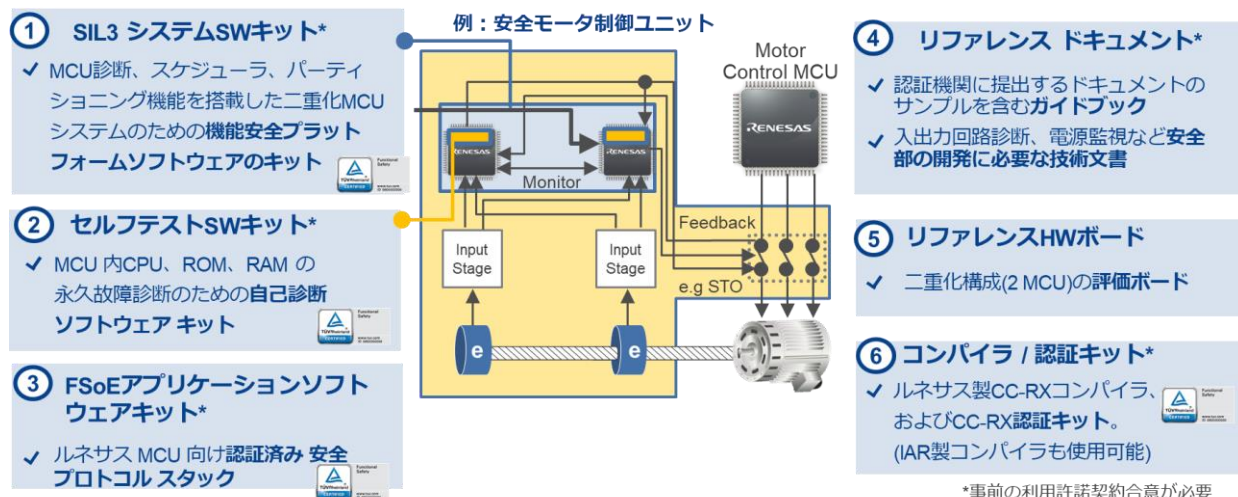


図 19. ルネサスの産業機器向け機能安全ソリューションの内容

結論

RX66T/72T は、最新の RXv3 コア(CPU)、及び三角関数アクセラレータを搭載することにより、従来品に対して 3.7 倍以上のパフォーマンスがあり、複数モータ制御に最適な周辺機器を備えているため、最大4つのモータ駆動を容易に実現出来ます。さらに通信データ暗号化処理の AES や RSA などの暗号キーや、ROM データの読み出し保護などの暗号機能を搭載しているため、今後セキュリティ対応が必須になる機器に対しても、MCU 単体でセキュアな環境を容易に構築出来ます。

モータ制御開発ソリューションもインバータ評価用のボード、サンプルソフト、デバッグツールを用意しており、開発検討から開発&デバッグの時間を大幅に削減出来ます。
機能安全対応の開発に対して、IEC61508 の SIL3 対応“産業機器向け機能安全ソリューション”により、従来開発手法に比べ 60%以上の削減効果が得られます。

ルネサスは、今後もお客様システムの BOM コスト削減、機能性アップ、開発効率アップに貢献していきます。

関係リンク

- [RX66T](#)、32bit モータ制御 MCU / 64 to 144 pin
160MHz/最大 1MB Flash/USB/CAN/PGA/セキュリティ
- [RX72T](#)、32bit モータ制御 MCU / 100 to 144 pin
200MHz/最大 1MB Flash/USB/CAN/PGA/セキュリティ/レジスター括退避/TFU
- [RX モータコントロールソリューション](#)
- [産業機能安全ソリューション](#)

© 2020 ルネサスエレクトロニクスまたはその関連会社 (Renesas) 無断複写・転載を禁じます。全著作権所有。すべての商標および商品名は、それぞれの所有者のものです。ルネサスは、本書に記載されている情報は提供された時点では正確であると考えていますが、その品質や使用に関してリスクを負いません。すべての情報は、商品性、特定の目的への適合性、または非侵害を含むがこれらに限定されないことを含め、明示、黙示、法定、または取引、使用、または取引慣行の過程から生じるかどうかを問わず、いかなる種類の保証もなく現状のまま提供されます。ルネサスは、直接的、間接的、特別、結果的、偶発的、またはその他のいかなる損害についても、そのような損害の可能性について通知された場合でも、本書の情報の使用または信頼から生じる責任を負いません。ルネサスは、予告なしに製品の製造を中止するか、製品の設計や仕様、または本書の他の情報を変更する権利を留保します。すべてのコンテンツは、米国および国際著作権法によって保護されています。ここで特に許可されている場合を除き、本資料のいかなる部分も、ルネサスからの事前の書面による許可なしに、いかなる形式または手段によっても複製することはできません。訪問者またはユーザーは、公共または商業目的で、この資料の派生物を修正、配布、公開、送信、または作成することを許可されていません。