

RT Box *DEMO MODEL*

Brushless DC Machine Demo Application for LaunchPad-Nucleo Interface

LaunchPad-Nucleoインタフェース用ブラシレスDCマシンデモアプリケーション

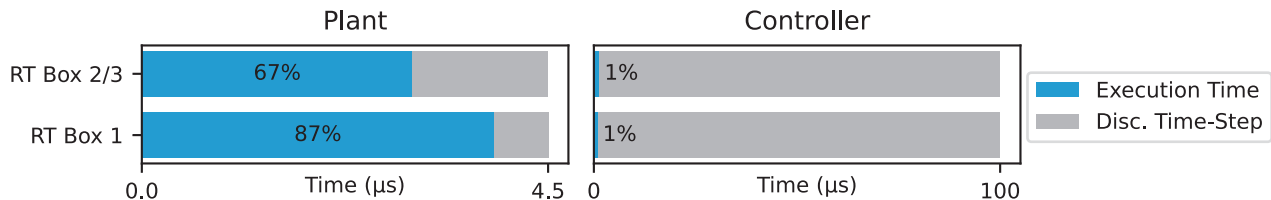
Last updated in RT Box TSP 2.3.8

1 はじめに

PleximのLaunchPad-Nucleoインタフェースには、プログラム済みのTI LaunchXL-F28069Mが付属しているため、ユーザーはサンプルのHIL(hardware-in-the-loop)アプリケーションを使用してRT Boxをすぐに使い始めることができます。マイクロプロセッサ(MCU)に事前プログラムされている制御ロジックは、ブラシレスDC(brushless DC: BLDC)マシン用の基本的な台形整流アプリケーションです。このデモには、プログラム済みのMCUで使用するBLDCドライブのRT Boxモデルが含まれており、RT Boxを使用するために必要な基本的な手順を示します。

このモデルの離散化ステップサイズと平均実行時間を図1に示します。

図1: 2台のRT Boxで実行した場合のパフォーマンス概要



1.1 要求仕様

このデモモデルを実行するには、次の製品が必要です(www.plexim.comから入手可能):

- [PLECS RT Box](#)1台と[PLECS](#)および[PLECS Coder](#)ライセンス1つずつ
- [RT Box Target Support Package](#)
- [LaunchPad-Nucleoインタフェース](#)
- TI Launchpad LaunchXL-F28069M。LaunchPad-Nucleoインタフェースには、プログラム済みの28069 LaunchPadが付属しています。プログラム済みのデモアプリケーションを使用せずにご自身のLaunchPadを使用する場合は、セクション [3.5](#)の手順に従ってください。
- RT Box の初期セットアップについては、[RT Box User Manual](#)のクイックスタートガイドに記載されている、PLECSとRT Box の設定手順に従います。

注意 このモデルには、以下からアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています:

PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

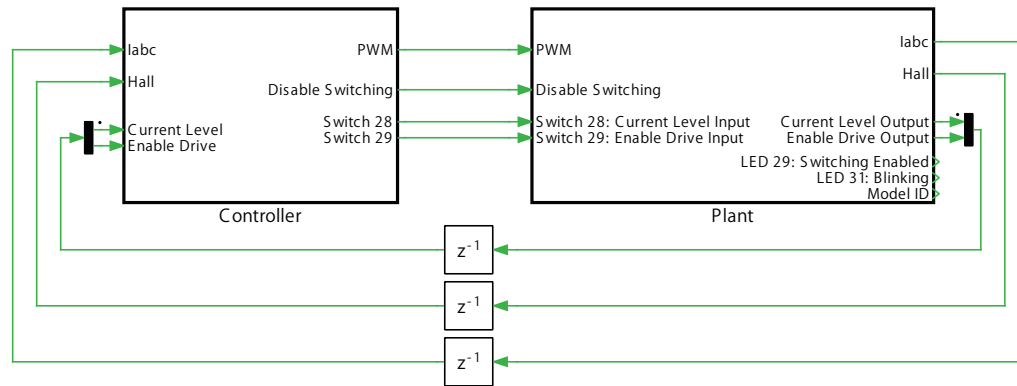
PLECS Blockset: Simulinkモデルウィンドウで右クリック -> モデル プロパティ -> コールバック -> InitFcn*

2 モデル

PLECSシミュレーションモデルは、図2に示すように、"Plant"と"Controller"という2つのサブシステムに分かれています。"Plant"サブシステムは、RT Box上でリアルタイム実行用に構成されたBLDCドライブモデルを表します。プログラム済みのMCUは、"Plant"サブシステムを実行している RT Boxに接続すると、閉ループ電流制御を実行します。"Controller"サブシステムは、使用可能な場合は2台目のRT Boxで実行されるように構成されます。"Controller"サブシステムは、MCUにプログラム済みの制御ロジックを表現したもので、LaunchPad-Nucleoインタフェース接続とピン互換性があります。

両方のサブシステムは、編集ニューからサブシステム -> 実行の設定...からコード生成機能の有効化にチェックすると、コード生成が有効になります。この手順は、PLECS Coderからサブシステムのモデルコードを生成するために必要です。

図2: PlantとControllerサブシステムのトップレベルの回路図



2.1 電源回路

電源回路は、図3に示すように、24VDC電源、3相インバータ、およびBLDCマシンで構成されています。マシンは、慣性と速度に依存する摩擦コンポーネントとしてモデル化された機械的負荷に接続されます。

ロータの位置は3つのHallセンサを使用して感知します。Hallセンサは、BLDCマシン内の永久磁石の磁場極性を検出します。センサは電気角120度で配置されており、1つのHallセンサの状態は電気角60度ごとに変化します。シミュレーションモデルでは、マシンの角度が3つのHallセンサの状態に変換され、デジタル出力を介してコントローラに接続されます。

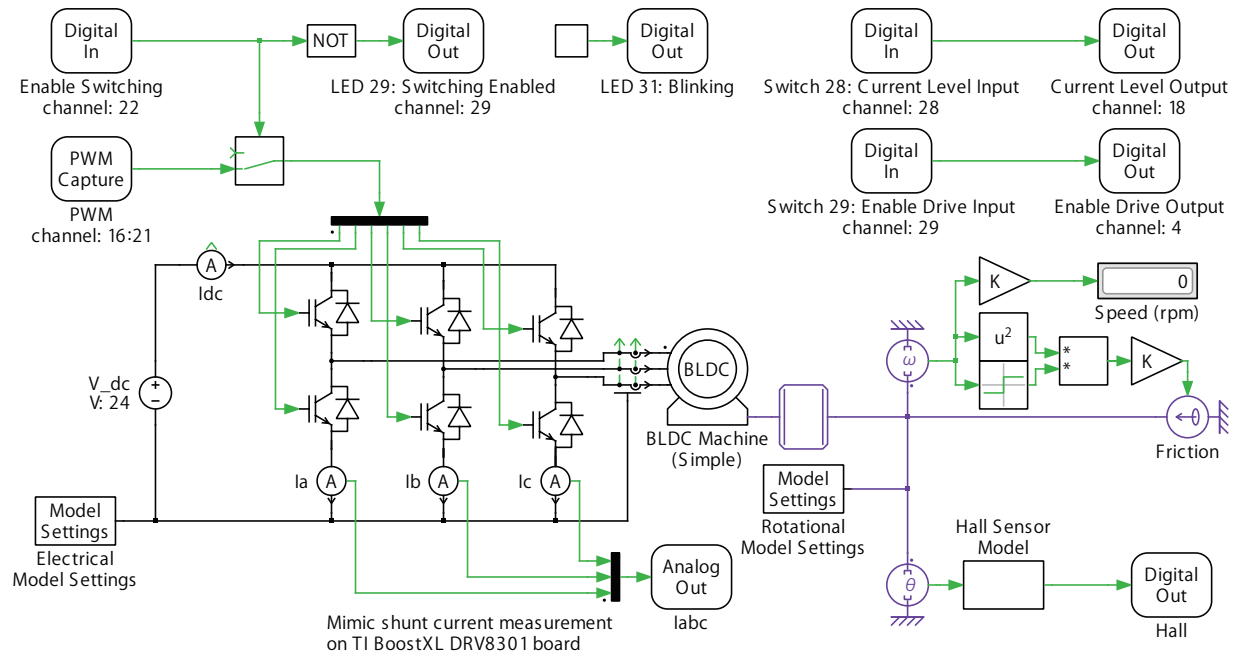
電流センシング手法は、ローサイドシャントを使用してマシンのステータ電流を測定するTI BOOSTXL DRV8301ボード[1]の特性をモデル化します。測定した電流は、RT Boxのアナログ出力ピンに接続します。RT Boxのアナログ出力のスケールリングとオフセットは、TI BOOSTXL DRV8301ハードウェアの電流センシング回路を表します。

追加のデジタルI/Oは、LaunchPadコントローラとのインタフェースに使用し、LaunchPad-Nucleoインタフェースのステータス情報の表示に使用します。アクティブローのPWMイネーブル信号は、TI BOOSTXL DRV8301のゲートイネーブルロジックをモデル化するDI22を介して設定します。LaunchPad-Nucleoインタフェース上の2つのLEDはステータス情報を表示します。LED DO29はスイッチング信号がアクティブであることを示します。LED DO31はモデルの実行中に1Hzの速度で点滅します。

スライドスイッチDI29は、コントローラの起動と再起動に使用します。スライドスイッチDI28は、電流制御ループのリファレンス値を変更します。スイッチの状態は、RT Boxのデジタル入力から検知し、RT Boxのデジタル出力DO4およびDO18を介してMCUのGPIOに中継します。

注意 インタフェースボードのスライドスイッチDI29は、MCUのPWM出力を有効または無効にします。

図3: 機械的負荷を伴うBLDCドライブ



[表1](#)に、このデモモデルの主なピンの割り当てを示します。

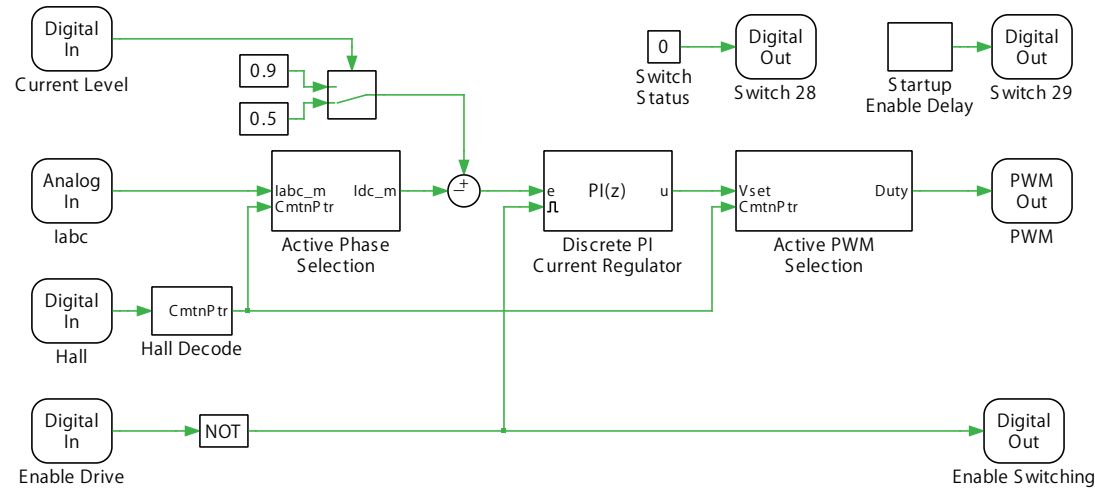
表1: BLDC I/Oピンマップ^o

Feature	RT Box Channel	LaunchPad Pin
Ia	AO12	J7 67
Ib	AO13	J7 68
Ic	AO14	J7 69
Hall A	DO2	J1 5
Hall B	DO6	J2 13
Hall C	DO7	J2 12
PWM A _H	DI16	J8 80
PWM A _L	DI17	J8 79
PWM B _H	DI18	J8 78
PWM B _L	DI19	J8 77
PWM C _H	DI20	J8 76
PWM C _L	DI21	J8 75

2.2 制御

制御ロジックは付属のMCUに事前にプログラムされており、LaunchPad-Nucleoインタフェースを介して RT Boxに接続します。デモモデルには、コントローラとしてプログラム済みのMCUを使用するだけでなく、2台目のRT Boxにデプロイできる類似の制御システムも含まれています。[図4](#)は制御手法の概要を示しています。

図4: RT Boxの制御ロジック



制御システムはBLDCモータの台形整流を実現します[2]、[3]。台形整流は、6段階整流または2相オン制御とも呼ばれます。この手法では、BLDCの電気回転を電気角60度の6つのセクタに分割します。3つのHallセンサの読み取り値は、ロータのおおよその位置を示すセクタ読み取り値にデコードされます。表2は、機械の電気角、セクタ、ホールセンサの読み取り値、および必要なマシンの相電流の関係を示しています。

各セクタでは、インバータレグ2つがアクティブで、3つ目のレグは常に非アクティブになります。たとえば、Sector 1では、B相ハーフブリッジの上部スイッチが変調し、B相ハーフブリッジの下部スイッチは閉じたままになるため、B相に正のDC電流が流れます。マシンのA相に等しく逆向きの電流が流れ、C相は断線したままになります。

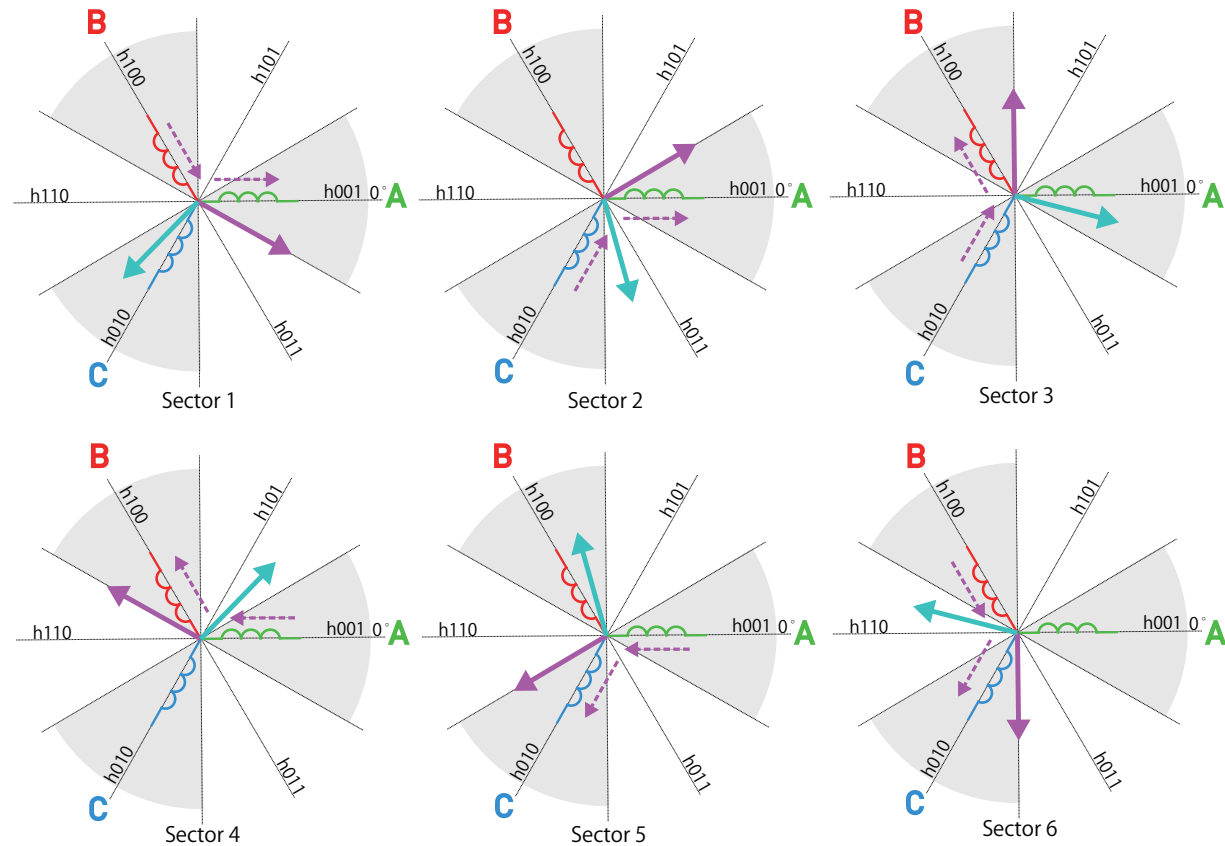
表2: BLDC整流テーブル

Rotor Electrical Angle (θ_e)	Sector	Hall A	Hall B	Hall C	Ia	Ib	Ic
$210^\circ \leq \theta_e < 270^\circ$	1	0	1	0	-	+	0
$270^\circ \leq \theta_e < 330^\circ$	2	0	1	1	-	0	+
$330^\circ \leq \theta_e < 30^\circ$	3	0	0	1	0	-	+
$30^\circ \leq \theta_e < 90^\circ$	4	1	0	1	+	-	0
$90^\circ \leq \theta_e < 150^\circ$	5	1	0	0	+	0	-
$150^\circ \leq \theta_e < 210^\circ$	6	1	1	0	0	+	-

マシンの各相を正しい順序で通電すると、回転磁界を生成します。図5は完全な整流シーケンスの概念を示しています。図では、A、B、C コイルと、各セクタ内のHallの読み取り値が示されています。相電流ベクトルはマゼンタの破線、ステータコイルによって生成される磁束の方向はマゼンタの実線のベクトル、シアンベクトルは回転子の位置を示しています。ロータがSector 1にある場合、ステータコイルによって生成される磁束はロータを $90 \pm 30^\circ$ 進めます。ロータがSector 2に入る(Hallの状態の変化によって示されます)と、PWMパターンが変化してC相とA相に電流が流れます。ステータコイルによって生成された磁束は、再びロータを $90 \pm 30^\circ$ 進めます。

離散PIレギュレータが相電流の大きさを制御します。"Active Phase Selection"サブシステムは、どの位相電流が電流コントローラのリファレンスとなるかを決定します。正しい位相は、整流間隔に応じて変化する1Dルックアップ・テーブルを使用して選択されます。"Active PWM Selection"サブシステムは、各整流間隔中にどのPWMがアクティブになるかを設定し、同様のルックアップテーブルベースの実装を使用します。

図5: 電流ベクトル(マゼンタ)とロータ配置(シアン)によるBLDC整流シーケンス



3 シミュレーション

シミュレーション モデルは、リアルタイムでテストする前に、デスクトップPC上のPLECSでオフラインで実行できます。リアルタイムシミュレーションのために、BLDCおよび駆動システムのプラントモデルは常にPLECS RT Boxでデプロイします。コントローラは、プログラム済みのLaunchPadデバイスまたは2台目のRT Boxのいずれかになります。

3.1 LaunchPadコントローラでRT Boxをプログラム

このセクションでは、LaunchPad-Nucleoインタフェースで使用するためにデモモデルをRT Boxにアップロードする手順について説明します。RT BoxとLaunchPad間のハードウェア接続を図6に示します。

始める前に、Launchpad-Nucleoインタフェースで以下のハードウェア構成を確認してください:

- LaunchPadのJP3、JP4、JP5、およびJP7をクローズ
- LaunchPadのJP1、JP2、およびJP6をオープン
- LaunchPadのDIPスイッチ1と2はプロセッサから離れた方向(外側)
- LaunchPadのDIPスイッチ3はプロセッサの方向(内側)
- LaunchPad-NucleoインタフェースのRSTジャンパはオープン

RT Boxでリアルタイムモデルを実行するには、以下の手順に従ってください:

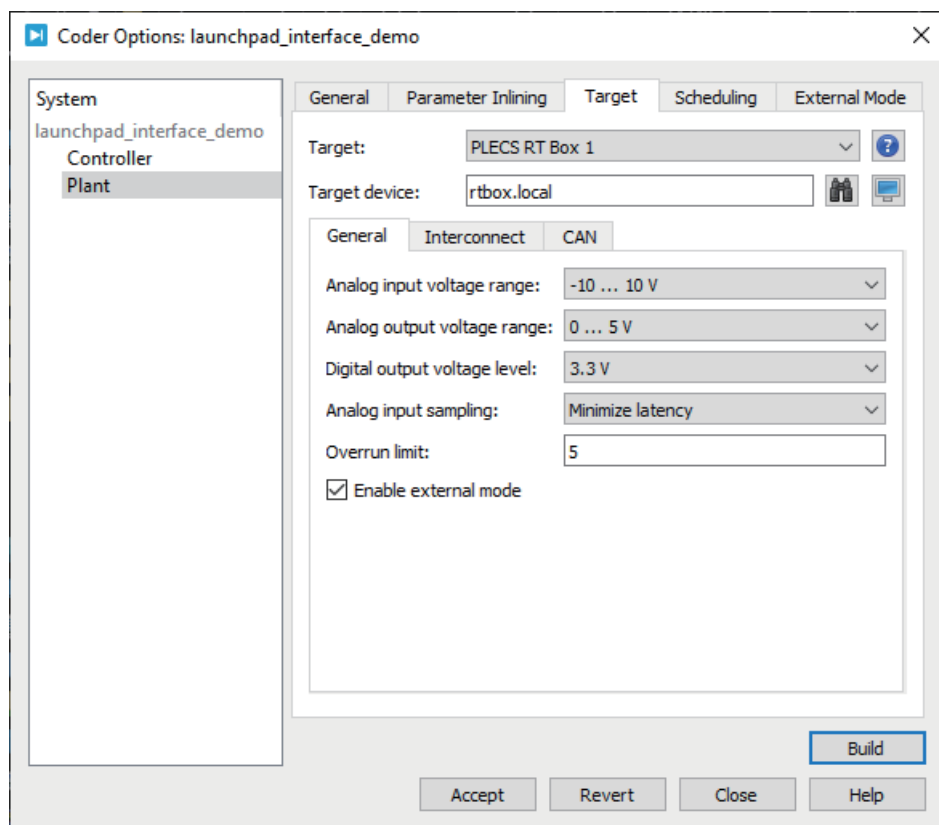
- **Coder**メニュー -> **Coderオプション...**を選択します。図7のようなウィンドウが表示されます。
- ウィンドウの左側に表示される**システム**のリストから**Plant**を選択します。

図6: RT Boxを使用したHIL検証のハードウェア設定



- ターゲットタブに切り替えます。🏠アイコンをクリックし、利用可能なデバイスのリストからRT Boxを選択して、**ターゲットデバイス**を選択します。
- **確認**をクリックし、**ビルド**をクリックします。これでモデルがコンパイルされ、RT Boxに自動的にダウンロードされます。
- RT Box 1の青色の実行LEDが点灯しているか、またはRT Box 2と3のディスプレイが更新されていることを確認します。

図7: Coderオプションウィンドウ



3.2 外部モードへ接続

外部モードでは、RT Boxで実行するリアルタイムシミュレーションにアクセスできます。これを使用すると、モデルのスコープを介してハードウェアからのシミュレーション信号を視覚化したり、調整可能なモデルパラメータを更新および変更が行えます。

図8のように、**Coderオプション...**ウィンドウで**外部モード**タブに切り替えます。左側のメニューで**Plant**が選択されていることを確認し、**接続**をクリックしてPLECSとRT Boxで実行しているモデル間の通信を開始します。**自動トリガを有効化**をチェックします。

ドライブ制御を有効にするには、スイッチDI-29をhighに設定します。PlantモデルのPLECSスコープに書き込み、制御動作を解析します。図9は、モデルのElectrical Scopeからのデータを示しており、台形整流を使用したPWM信号とマシンの相電流を示しています。

注意 スイッチDI-28を使用して、制御システムの電流リファレンスを変更できます。

図8: 外部モードでBLDCモデルに接続

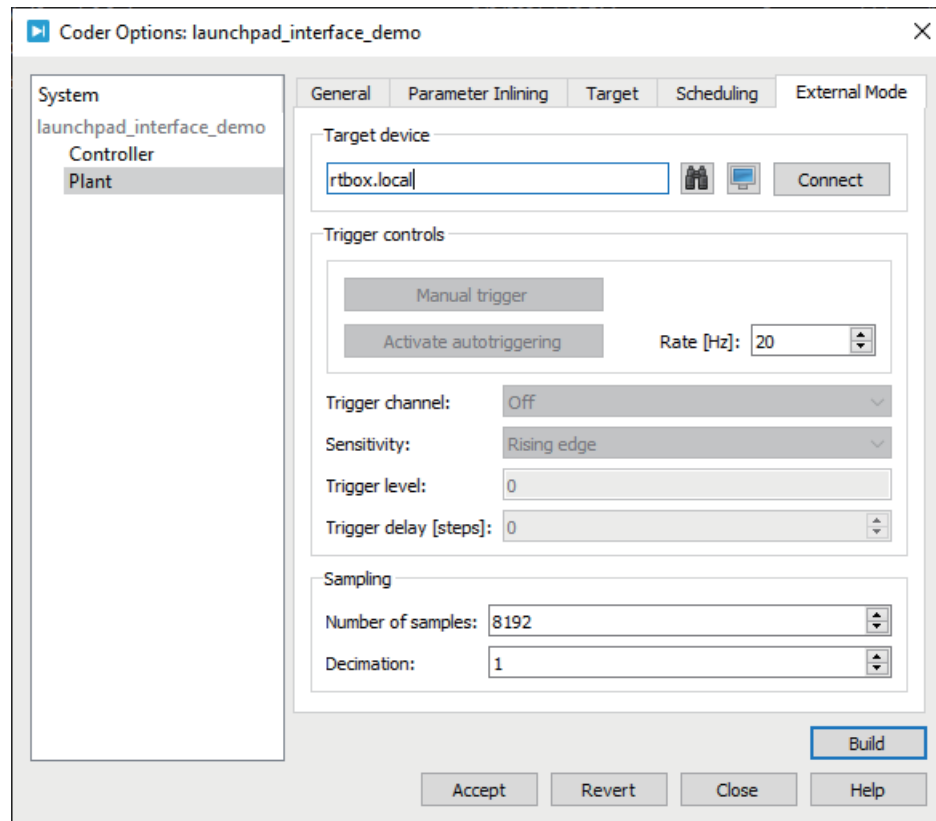
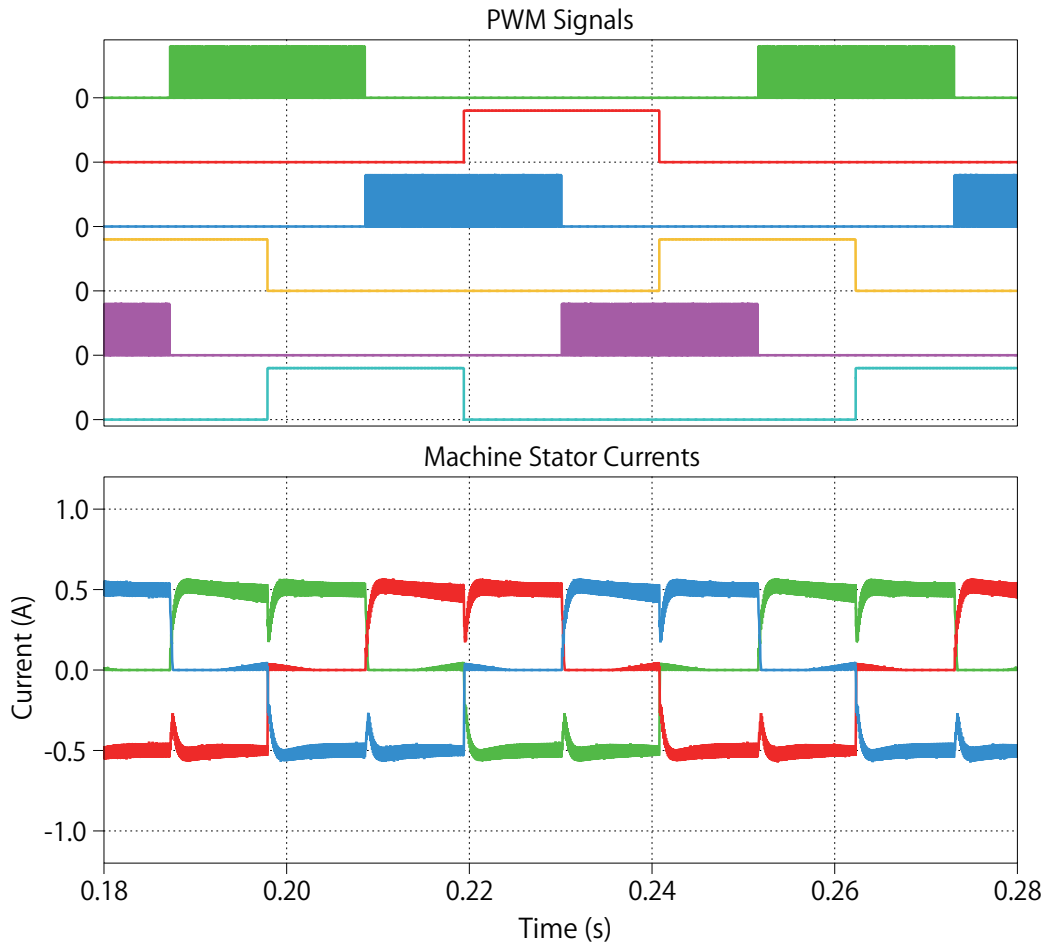


図9: 2相PWM信号とステータ電流を示すPLECSスコープのキャプチャ



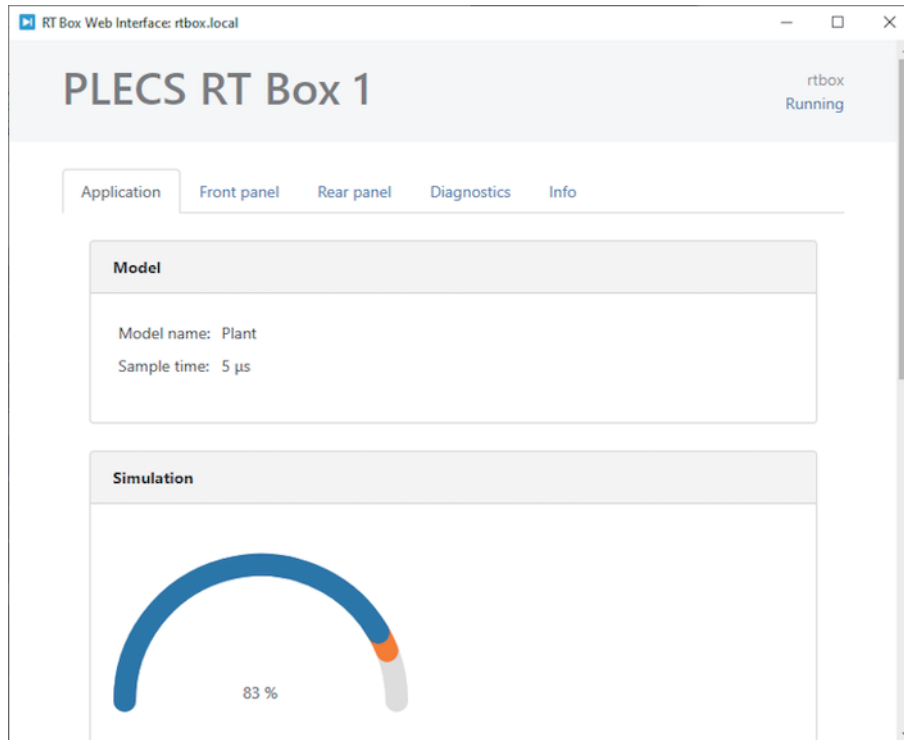
3.3 RT BoxWeb Interface

Web Interfaceは、RT Boxで実行しているモデルに関する情報と診断オプションを提供します。これには、Coderオプションウィンドウの**ターゲット**タブまたは**外部モード**タブの下にある  アイコンをクリックしてアクセスできます。Web Interfaceウィンドウを [図10](#)に示します。

プロセッサの負荷統計は、モデルの計算に必要な時間に関する情報を明らかにするため、選択したステップサイズを検証するための便利なツールとして機能します。プロセッサに過負荷をかけず、安全マージンを維持してください。

注意 作動中のモデルでは、アイドル状態のモデルよりも長い処理時間が必要です。外部モードを使用する場合は、追加のプロセッサ負荷が必要になります。

図10: RT Box Web Interface



3.4 2台目のRT Boxをコントローラとしてプログラム

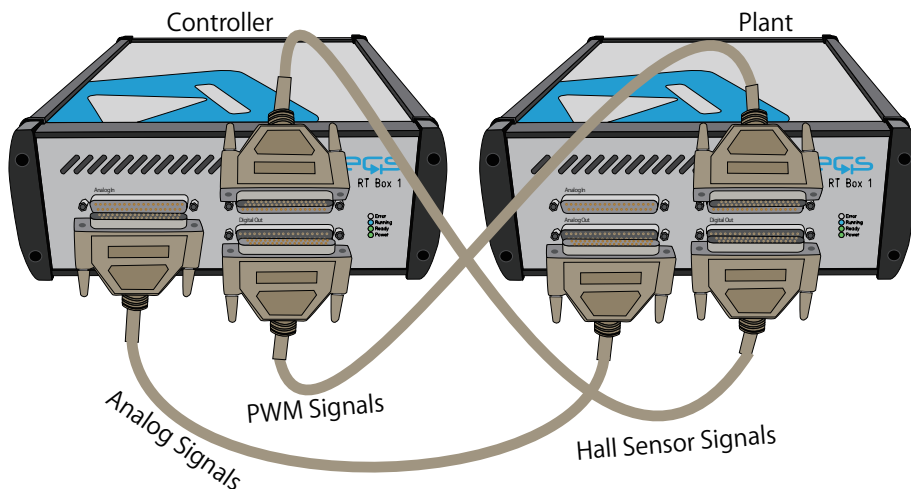
プログラム済みのLaunchPadの代わりに、2台の RT Boxをコントローラとして使用できます。

注意 RT Box CEは、アナログ入力チャンネル数が少ないため、このデモのController Boxとして使用できません。

2台のRT Box("Plant"および"Controller")は、[図11](#)のように3本のDB37ケーブルを使用してセットアップする必要があります。次に、[セクション3.1](#)で説明している手順に従って、2台目のRT Boxを"Controller"モデルでプログラムします。

外部モードを介してController RT Boxに接続することもできます。*Switch Status*と電流リファレンス設定ポイントは、外部モード経由で接続中に変更できるように設定しています。これらの定数は、モデルをビルドする前に、**Coder オプション...**ウィンドウの**パラメータのインライン化**タブにある**例外**リストに追加されています。

図11: 2台のRT Boxを使用したデモモデルのリアルタイム操作のためのハードウェア構成



3.5 ファームウェアのアップロード

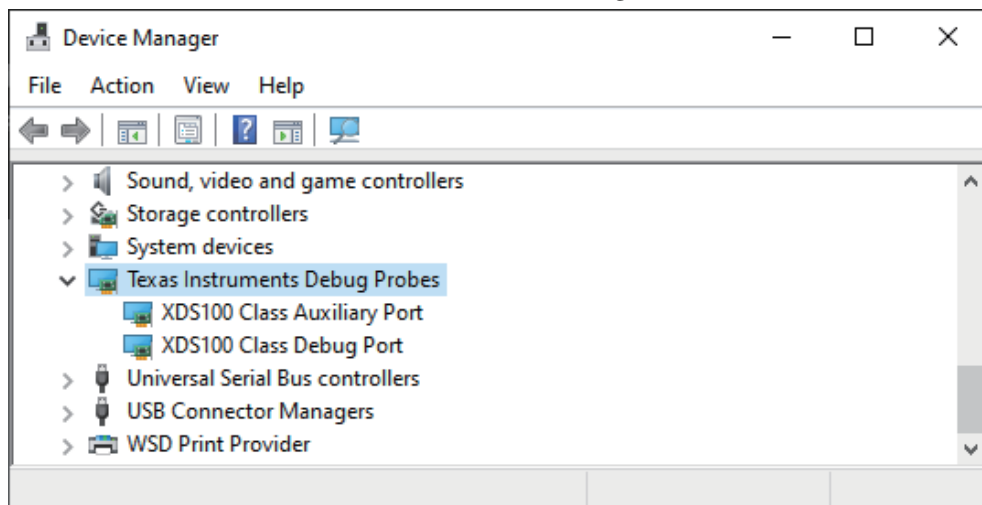
デモモデルを実行するために必要なコントロールはTI Launchpadに事前にプログラムされており、すぐに使用できます。次のセクションでは、デモアプリケーションを使用してMCUを再プログラムする方法、または更新を実行する方法を示します。これを行わない場合、このセクションをスキップしてください。このセクションはWindows PCにのみ適用されることに注意してください。

RT Boxの電源をオフにします。JP6を除くLaunchPad上のすべてのジャンパが閉じており、すべてのDIPスイッチがプロセッサから離れた方向を向いていることを確認します。

LaunchPadのJTAG/SCI USBポートをPCに接続します。Windowsのデバイス マネージャーを開き、TI Debug Probesがリストされていることを確認します。

ポートが列挙されていない場合、FTDIドライバをインストールする必要がある場合があります。

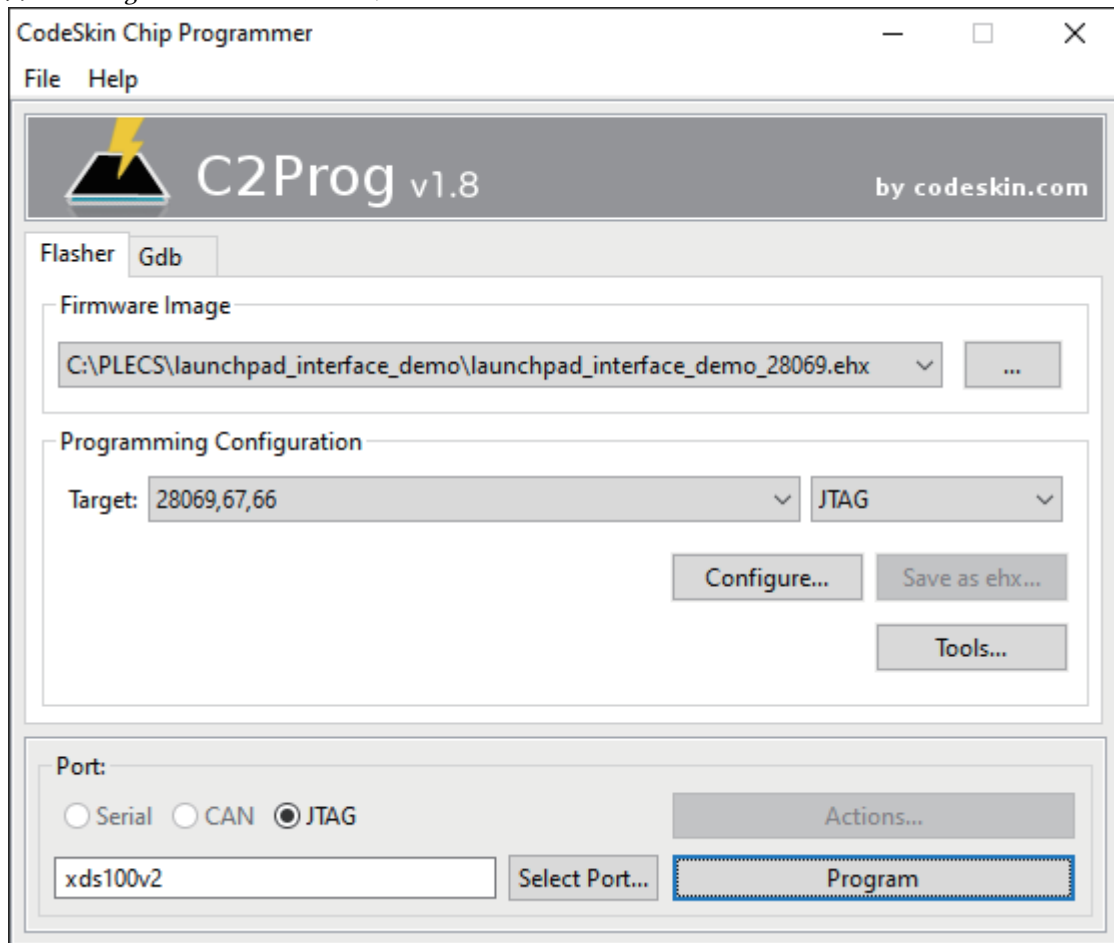
図12: Windowsのデバイス マネージャーにリストされているTI Debug Probes



事前コンパイルされた実行ファイルは、PLECSシミュレーションモデルと同じフォルダ内のデモパッケージ フォルダにあります。2つのファイルが付属しています。launchpad_interface_demo_28069.ehxファイルは、以下の手順に従ってC2Prog [4]で使用します。2つ目のファイルlaunchpad_interface_demo_28069.outは、TIのUniflashツール[5]でデバイスをプログラムするために使用します。

C2Progでlaunchpad_interface_demo_28069.ehxファイルを選択し、ポートをXDS100v2に設定します。**Program** ボタンをクリックします。

図13: C2ProgでLaunchPadをフラッシュする



再フラッシュが完了したら、USBケーブルを外し、DIPスイッチ3を切り替えます。このスイッチはプロセッサ側を向いています。LaunchPadのJP1とJP2をオープンにします。これでLaunchPadの操作準備が完了しました。

4 まとめ

LaunchPad-Nucleoインタフェースには、プログラム済みのLaunchXL-F28069Mが付属しています。MCU上の制御ロジックは、BLDCドライブの台形整流アプリケーション用です。このモデルは、デモアプリケーションとともにRT Boxを使用する方法を示し、RT Boxを使用するために必要な基本的な手順を示しています。

5 参考文献

- [1] BOOSTXL-DRV8301 Motor Drive BoosterPack featuring DRV8301 and NexFET™ MOSFETs
URL: <https://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8301>
- [2] B. Akin and M. Bhardwaj, Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors, Texas Instruments, 2015.
- [3] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 120° Square-Wave Commutation for Brushless DC Motors, 2018.
- [4] C2Prog Free Flash Programmer for TI MCUs
URL: <https://www.codeskin.com/c2prog-download>
- [5] UNIFLASH UniFlash stand-alone flash tool for microcontrollers, Sitara™; processors and SimpleLink™
URL: <https://www.ti.com/tool/UNIFLASH>

改訂履歴:

RT Box TSP 1.1.1 初版

RT Box TSP 2.2.1 PIL依存関係を解決

RT Box TSP 2.3.8 新しいLaunchPad-Nucleoインタフェースを使用



Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00 Phone

+41 44 533 51 01 Fax

✉ Plexim GmbH Mail

Technoparkstrasse 1
8005 Zurich
Switzerland

@ info@plexim.com Email

<http://www.plexim.com> Web



アドバンオートメーションへの連絡方法:

☎ +81 3 5282 7047 Phone

+81 3 6285 0250 Fax

✉ ADVAN AUTOMATION CO.,LTD Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku
Tokyo, 101-0047
Japan

@ info-advan@adv-auto.co.jp Email

<https://adv-auto.co.jp/> Web

RT Box Demo Model

© 2002–2025 by Plexim GmbH

このマニュアルで記載されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの事前の書面による同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks、Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。