

電動式パワーステアリング(EPS)のモデルベース開発

デモンストレーション概説書

近年、環境問題への注目が高まり、自動車産業を中心にエンジンや油圧等のアクチュエータから高効率のモータへ移行する研究開発が盛んになってきています。電動式パワーステアリング(以下EPS)もその一つです。

EPSのトルクアシストモータとしては、ブラシのメンテナンスが不要なDCブラシレスモータが望まれますが、ブラシモータと比較して複雑な制御が要求されます。また、EPSでは人間の微妙なハンドリング感覚にあわせたトルクアシスト量の十分なチューニングが望まれます。こうした大規模、複雑なコントローラ開発の効率化のソリューションとして、Simulink®によるモデルベース開発が注目されています。

本デモでは、EPSコントローラ開発事例を題材にモデルベース開発の流れを示すデモンストレーションをご紹介します。

キーワード:ベクトル制御、セルフ・アライニングトルク、HILS、PILS、ラピッドプロトタイピング

1 デモの説明

1.1 EPSシステム概要

パワーステアリングは、自動車において、操舵を補助する装置です。これにより運転者は軽い力で操舵することができます。操舵アシストトルクの発生方法により、油圧式と電動式に大別されます。油圧式の場合、エンジンの動力を使って、常に油圧を昇圧する必要があり、燃費に影響します。これに対してEPSは必要時のみ電力を供給してトルクアシストするため、油圧式のものより燃費が向上します。

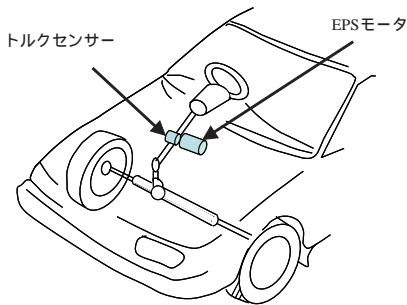


図 1-1 EPS システム

1.2 デモシステム概要

図 1-2 にデモシステム構成図を示します。

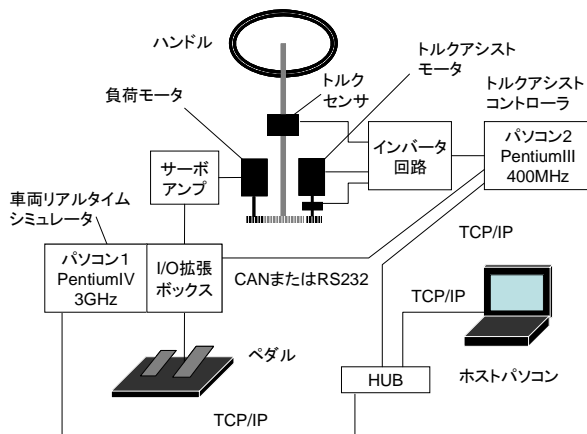


図 1-2 デモシステム構成図

ハンドルにはギアを介して2つのモータが左右に取り付けられています。一方は車両からハンドルへと伝わる負荷トルクを模擬するために用い、もう一方は、操舵をトルクアシストするために利用します。

本デモでは、ステアリングの負荷トルク出力を含んだ車両全体モデルと、トルクアシストコントローラモデルの2つを同時にリアルタイムシミュレーションします。ホストパソコンのMATLAB®上で作成したモデルをコンパイル・ビルドし、TCP/IP経由でそれぞれパソコンにダウンロードして実行します。

パソコン1では、エンジン、機構のダイナミクスを持った自動車モデルがリアルタイムで動作しており、ハンドル入力による操舵、アクセル・ブレーキ入力による加減速が可能です。タイヤから発生しハンドルに伝わるトルクはサーボアンプを介して負荷モータにより出力されます。

パソコン2では、パソコン1からCANまたはRS232経由で受信した車速に応じてトルクアシストします。リアルタイムで電流形ベクトル制御モデルが動作しています。

1.3 モデルベース開発

Simulinkによるモデルベース開発の工程に関連する本デモの位置付けを説明します。図 1-3 にモデルベース開発フローを示します。

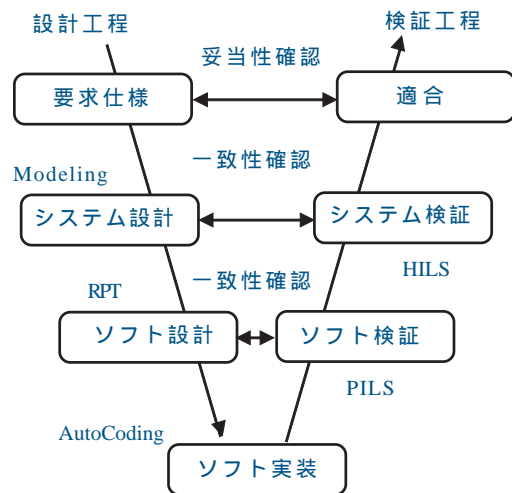


図 1-3 モデルベース開発フロー

・Modeling (システムレベルモデリング)

システム設計工程では、コントローラ、制御対象を含んだシステム全体のモデルをSimulinkにて作成します。このシステムレベルのモデルは実行可能な仕様書モデルとして活用できます。

EPSシステムでは、制御対象には、車両の機構部、エンジン、タイヤ、インバータ、モータ等が含まれます。機構部とモータ駆動部では、時定数の違いにより、シミュレーションのサンプル時間が大きく異なります。現実的なシミュレーション速度でデモをご覧いただくため、本デモでは、車両全体機構モデル(非リアルタイム)と、モータ制御系モデル(非リアルタイム)に分けてモデリングします。この段階では、シミュレーションはWindowsパソコン上で非リアルタイムで行います。

・RPT (Rapid Proto Typing)

システム設計からソフト設計にかけての工程では、コントローラモデルの詳細度を上げ、制御パラメータのチューニングを行います。

制御対象モデルの詳細度が低い(実機の応答とシミュレーション結果が高い精度で一致しない)段階では、Simulinkのコントローラモデルと、実機の制御対象を接続した、リアルタイムシミュレーションを行うことで、簡便に制御パラメータをチューニングできます。本デモでは、速度制御コントローラモデル(リアルタイム)と実機のDCブラシレスモータを接続して、リアルタイムシミュレーションを行い、モータ制御モデル(非リアルタイム)の結果と比較検証しました。その後、変更を加え、トルク制御コントローラモデル(リアルタイム)とし、図1-2の構成にてリアルタイムシミュレーションし、パラメータチューニングしています。

・AutoCoding, PILS (Processor-In-the-Loop-Simulation)

オプションツールにより、Simulinkのコントローラモデルから等価なANSI準拠のCコードを自動生成することができます。これにより、ハンドコーディングによるソフトウェア開発の工数を低減できます。ただし、ターゲット依存の部分はハンドコーディングして付け加える必要があります。PILSは、Simulinkモデルのコントローラ部を自動生成コードをターゲットのプロセッサ、またはそのエミュレータソフト上で実行し、Simulinkモデルとコ・シミュレーションしながらデバッグする方法です。

モータ制御系モデルのベクトル制御コントローラを自動生成コードに置き換えたPILSモデル(非リアルタイム)のシミュレーションを行います。

・HILS (Hardware-In-the-Loop-Simulation)

自動生成コードにターゲット依存コード、周辺I/Oドライバコードを付け加え、マイコンやDSPに実装後、実機コントローラと制御対象の試作機を含めたシステム検証が行われます。HILSは制御対象の試作機をSimulinkモデルのリアルタイムシミュレーションでエミュレートすることで、試作機レスの検証テストを可能にします。

本デモでは、車両全体モデルにハードウェアI/Oドライバブロックを接続した 車両全体機構モデル(リアルタイム)をリアルタイムシミュレーションして、試作機をエミュレートします。この車両シミュレータを利用して、自動生成コードが実装されたマイコン評価ボードの検証テストを行います。

本デモでは、図1-2の構成のRPTのデモを中心にご紹介しますが、別途、ご要望により、

- 車両全体モデル(非リアルタイム)
- モータ制御系モデル(非リアルタイム)
- 速度制御コントローラモデル(リアルタイム)
- PILSモデル(非リアルタイム)

のシミュレーションもご覧いただけます。

2 デモ詳細

2.1 システムレベルシミュレーション

2.1.1 車両全体機構モデル

EPSシミュレーションに必要なハンドルの重さは、主に路面からタイヤへの反力が影響します。タイヤに伝わる反力は車体の運動に依存しますので、車体全体機構モデルにより車体の運動をシミュレーションして、タイヤに働く力を計算しています。

車体全体機構モデルにおいて、トルク伝達系の大部分はSimDrivelineにてモデリングしています。図2-1にエンジンからトランスミッションまでのモデルの抜粋を示します。

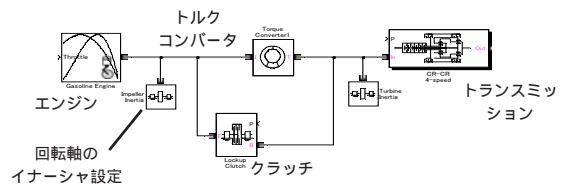


図2-1 トルク伝達系モデル

エンジン、トルクコンバータ、トランスミッション、クラッチ等の要素ブロックはSimDrivelineで提供されています。シャフトで結合されたメカニカルな各要素を表現するブロックを結線しモデリングしています。

提供されるブロックにはこの他にも、車両ダイナミクス、タイヤ等があり、SimDrivelineのみでも車両全体をモデリングすることができます。ただし、直進のみしか対応していないため、本デモでは、車体機構部、タイヤ部のモデルを加え車両全体をモデリングしています。

車体は水平面のみでの運動(3自由度)を持つシャーシの剛体の上に2関節の逆振子が乗せられた構造のモデルとしています。図2-2はSimMechanicsによりモデリングした車両の機構部のモデルです。タイヤのSubsystem内部では、実験公式Magic Formulaを使い、タイヤに掛かる力を計算しています。Magic Formulaは、タイヤの速度ベクトルにより決定されるスリップ角、車重を入力として、タイヤに掛かる横力、セルフ・アライニングトルク(ハンドルを曲げたとき、タイヤの直進方向に戻そうとする復元トルク)を出力します。

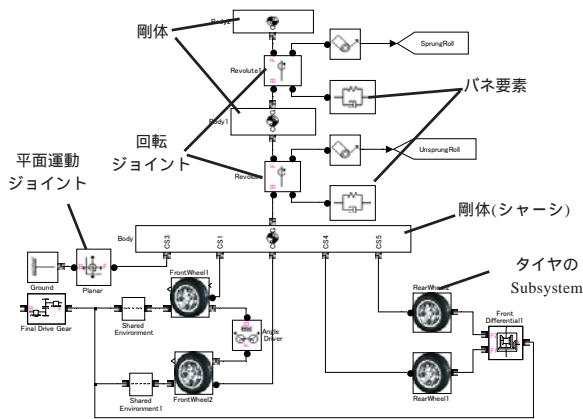


図 2-2 機構系モデル

図2-3は運転者のアクセル、ブレーキの踏み込み率の任意の時系列パターン、ハンドルの回転加速度、回転速度、回転角の任意の時系列パターンを入力として、シミュレーションを行ったときの結果です。

図 2-3(a)は車速度、(b)は上からタイヤの直進方向の駆動力、横力、セルフアライニングトルクの信号です。

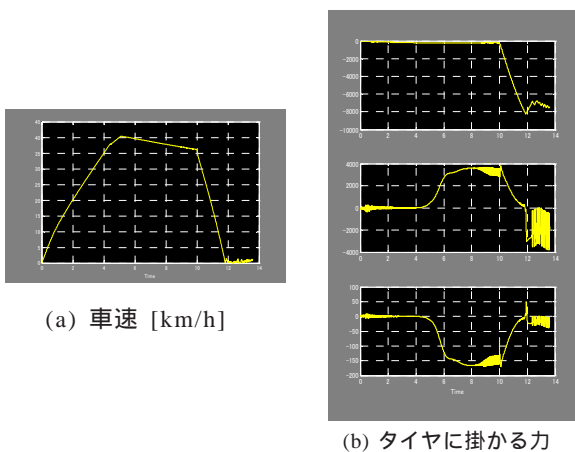


図 2-3 シミュレーション結果

2.1.2 モータ制御系モデル

トルクアシストは、トルクセンサにより、ハンドルに掛かるトルクを検出、フィードバックして、DC ブラシレスモータを電流型ベクトル制御の方式でトルク制御を行って実現しています。ベクトル制御のシステムが正しく動作しているかをシミュレーション検証するために、まず、扱いやすいロータ回転角速度制御にてシミュレーションしました。速度制御でモデリング・検証できれば、僅かな変更で、トルク制御モデルが作成できます。ここでは、モータ軸に何も取り付けない無負荷の運転を想定しています。このとき、モータ制御系は、コントローラ、各種センサ、電源、MOSFET ブリッジ回路のインバータ、DC ブラシレスモータで構成されます。DC ブラシレスモータ、MOSFETブリッジ回路、電流検出用シャント抵抗は、電気系モデリング支援ツールSimPowerSystemsを利用しています。図2-4にモータ制御系モデル、図2-5にコントローラのSubsystem内部のベクトル制御モデルを示します。

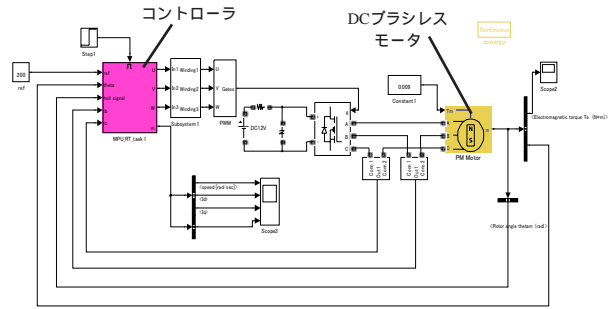


図 2-4 モータ制御系モデル

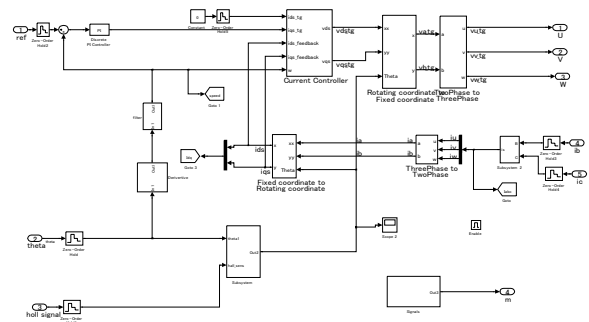


図 2-5 ベクトル制御ロジック
(コントローラ Subsystem の内部モデル)

図 2-6 は回転角速度の目標値 200[rad/s]にてシミュレーションを行ったときの結果です。

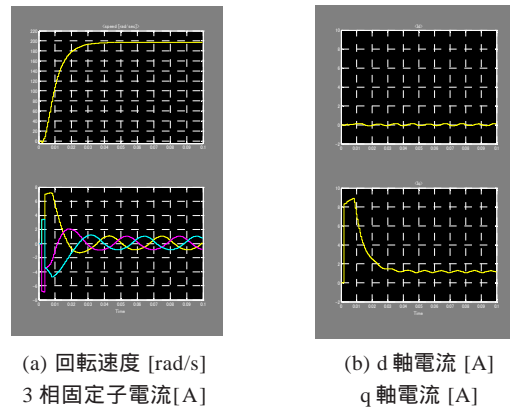


図 2-6 シミュレーション結果

2.2 RPT

図2-4 モータ制御系モデルのコントローラSubsystemをそのまま実コントローラとして活用し、実機のDCブラシレスモータを回転速度制御します。

ハードウェア構成は、図 1-2 デモシステム構成図において、ハンドル軸からギアを外して無負荷とし、トルクアシストモータ、インバータ回路、パソコン2、ホストパソコンからなります。ハードウェアI/Oは、インバータのゲートスイッチングのための3相PWMパルスジェネレータ、ロータリエンコーダによる角度検出のための、アップダウンカウンタ、ホールセンサ信号入力のためのDigital-Input、3相電流検出のためのA/D変換等です。

リアルタイムシミュレーションにはReal-Time Workshop®/xPC Targetを利用しています。xPC Targetは、x86系汎用パ

ソコンと汎用I/Oボードを使ったSimulinkモデルのリアルタイムシミュレーション環境を提供します。該当する各I/Oのデバイスドライバブロックをコントローラブロックと接続し、コンパイル・ビルドすれば、リアルタイムシミュレーションできます。Simulinkモデルがフロントエンドとなり、モデルからリアルタイムパラメータ変更、スコープによるリアルタイム信号モニタが可能でです。

本デモでは、回転角速度、3相電流、dq軸電流の信号を観測し、コントローラロジックの性能の検証、シミュレーション結果比較によるモータモデルの妥当性検証等を行います。

この工程により、仕様を満たすコントローラが得られれば、コントローラモデルから自動Cコード生成して実装工程へ移行します。この時、ターゲットマイコンの実行速度で実現可能であるかは、図2-7に示す実行モジュールのタスク実行時間のログから見積もることができます。

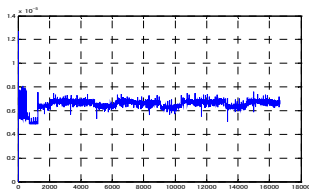


図 2-7 タスク実行時間のログ

2.3 PILS

マイコンの開発環境と連携することで、あらかじめ演算処理にかかる時間の概算や、ターゲットとしているマイコンの精度での計算精度、スタックオーバーフローなどの確認が行えます。ここでは、富士通社製のマイコン開発環境である Softune を使用し、前述の確認を行いました。

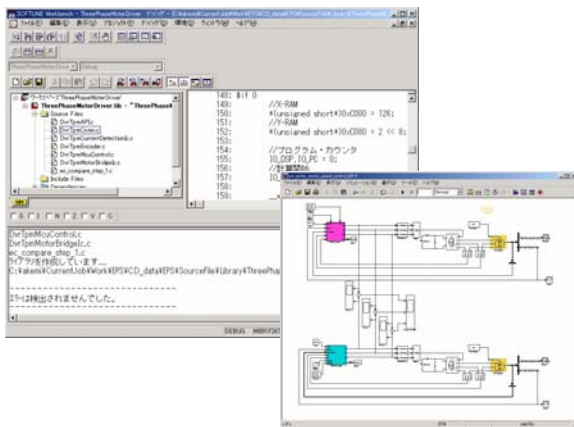


図 2-8 マイコン開発環境(富士通株式会社 Softune)と Simulink との練成

2.4 HILS

図1-2のパソコン2を富士通社製マイコン「MB91F267」を含む実ハードウェアに置き換えます。

車両全体モデル(非リアルタイム)に必要なデバイスI/Oブロックを接続し、コンパイル・ビルドして図1-2システム構成図のパソコン1にダウンロードし、xPC Targetにより、リアルタイムシミュレーションします。実機アクセル・ブレーキペダルの踏み込み操作により車両モデルの駆動、制動が行えます、また、ハンドルの操舵により車両モデルのコーナリングを行うことができます。リアルタイムシミュレーションで得られる車両運動の信号はVirtual Reality toolboxのオブジェクトと接続されており、アニメーションで車両の挙動を確認いただけます。



図 2-9 パーチャルリアリティによるアニメーション

モデルによりタイヤに掛かるトルクが計算され、負荷モータでハンドルにトルクが伝えられます。低速時には据え切りトルクの影響でハンドルは重く、高速時には軽くなると同時にハンドルを戻そうとするセルフ・アライニングトルクの影響が大きくなります。

EPSのトルクアシストコントローラを実行すると、低速時にはハンドルを軽く、高速時には、操舵を安定させるようにトルクが加えられます。

3 まとめ

EPSを題材にコントローラのモデルベース開発の一連の流れを示すデモを作成しました。システム設計工程では、モデリングを支援するオプションライブラリをご紹介しました。また、コストパフォーマンスに優れたパソコンによるリアルタイムシミュレーションのデモを行い、RPT,HILSのコンセプト、メリットを示しました。

本デモがモデルベース開発を適用される方のヒントになれば幸いです。

4 使用ツール

MATLAB, Simulink, Stateflow®, Stateflow® Coder Real-Time Workshop, xPC Target, Real-Time Workshop Embedded Coder, Gauges Blockset, SimDriveline, SimMechanics, SimPowerSystems, Virtual Reality Toolbox

本デモハードウェアは富士通株式会社により開発されました。

CYBERNET

本社 / 〒101-0022 東京都千代田区神田練馬町3 富士ソフトビル14F
 中部支社 / 〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-6-26 富士ソフトビル3F
 西日本支社 / 〒540-0028 大阪府中央区常盤町1-3-8 中央大通FNビル
 応用システム第1事業部 E-mail: infomatlab@cybernet.co.jp

TEL(03)5297-3565 (直通) FAX(03)5297-3648
 TEL(052)219-5197 (直通) FAX(052)219-5970
 TEL(06)6940-3610 (直通) FAX(06)6940-3602
 http://www.cybernet.co.jp/MATLAB

Copyright (c)2007 Cybernet Systems, Co., Ltd. All rights reserved. MATLAB, SimulinkはThe MathWorks, Inc.の登録商標です。その他の製品名とブランド名は、それぞれ該当する各社の商標または登録商標です。