

モーター制御設計 ～ プラントモデリングと制御設計の基本フロー ～

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部（制御）

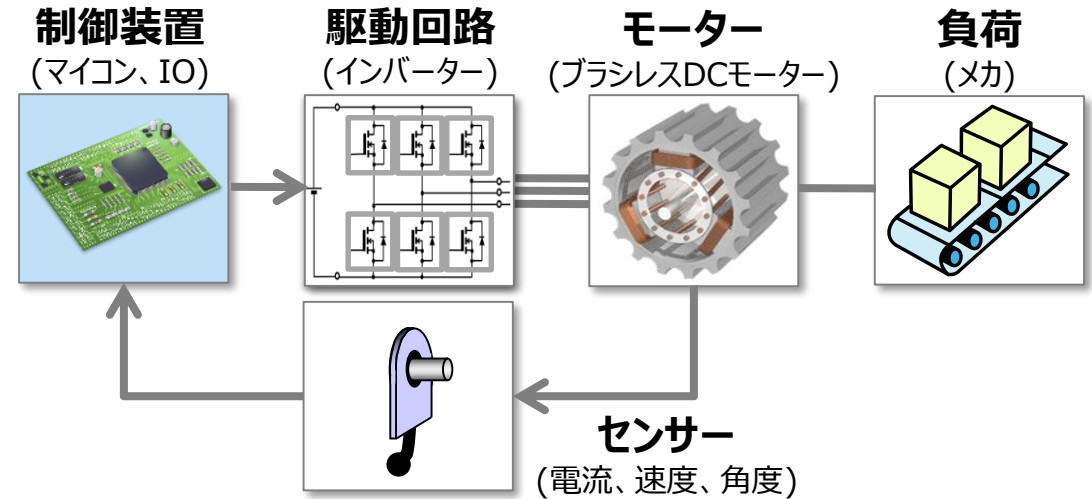
シニアアプリケーションエンジニア

福井 慶一

はじめに

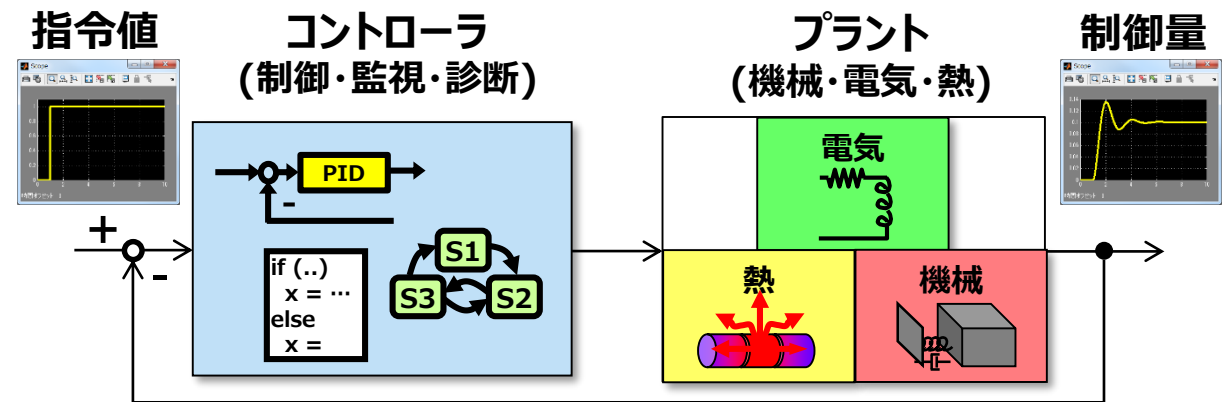
本Webセミナーの対象者

- **モーターの制御ロジックの開発者**
(例: 既存・新規の制御ロジックの妥当性の確認)
- **モーターを利用したシステムの開発者**
(例: メカの速度制御システムの機能・性能の検証)



本Webセミナーでお伝えしたいこと

MATLAB®プロダクトを使った
プラントモデリング・制御設計の基本フロー



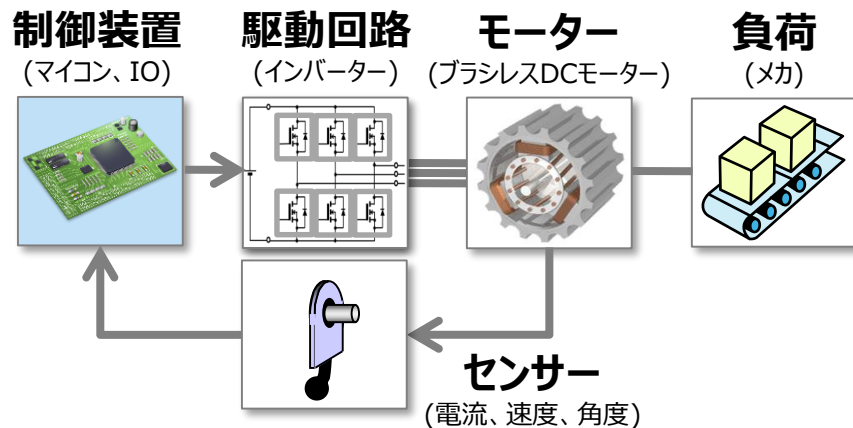
アジェンダ

- モーター制御の概要
- プラントモデリング、制御設計のMATLABソリューション
- 例題：速度制御システム
 - モーター制御のプラントモデリング、制御設計の基本フローを説明
- まとめ

モーター制御のトレンドと課題

高性能・高効率・長寿命化のために、複雑な制御でモーターの性能を引き出す必要がある。

→ 一つの解として、「ブラシレスDCモーターのベクトル制御技術」が利用されている。



- 機械：要求仕様に基づき、負荷のメカニズムを設計。
- 電気：モーター、センサー、駆動回路、マイコン、IOを設計。
- 制御：制御ロジック、パラメータの設計。

さらに、システムの小型・高出力化の要望から熱の対策や、システムの信頼性・安全性の要望から故障時の対策も重要に。

システムの複雑化に伴い、システム全体を俯瞰した機能・性能検証、制御設計がより重要に。

搬送装置	X軸ステージ	電動パワステ	HEV/EV/FCV	ドローン	ロボットアーム
搬送物の重さに関わらず 目標速度で運ぶ	目標位置まで移動して 正確に停止する	車両走行状況に応じて 操舵力をアシストする	車両走行状況に応じて 力行・回生をする	複数のモータを協調して 飛行する	モノをつかんで 所定の位置に運ぶ

アジェンダ

- モーター制御の概要
- プラントモデリング、制御設計のMATLABソリューション
- 例題：速度制御システム
 - モーター制御のプラントモデリング、制御設計の基本フローを説明
- まとめ

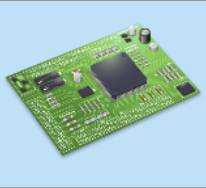
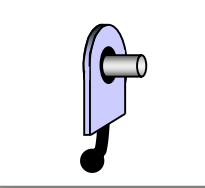
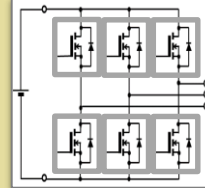

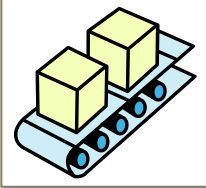
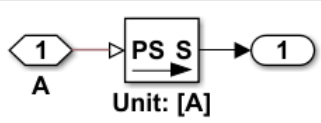
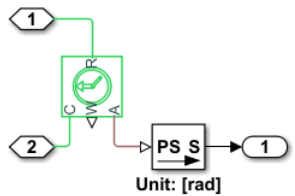
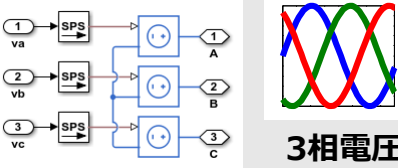
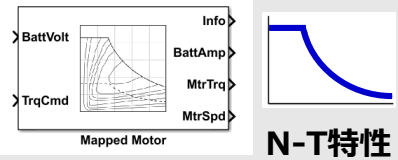
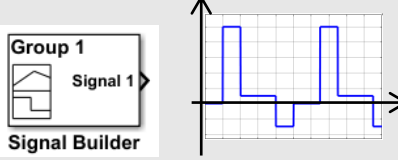
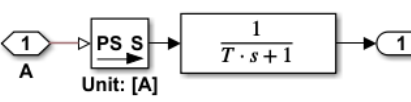
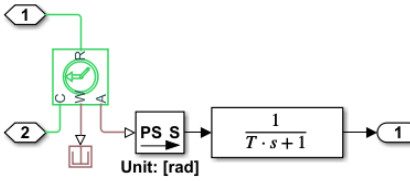
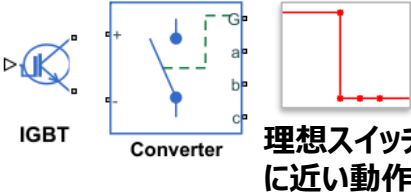
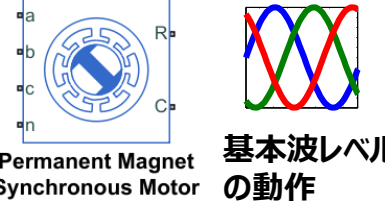
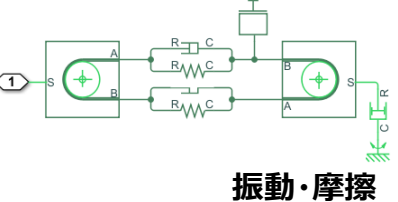
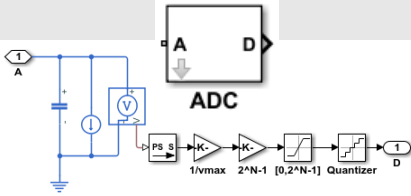
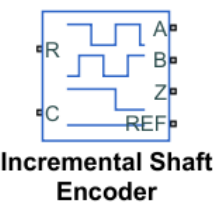
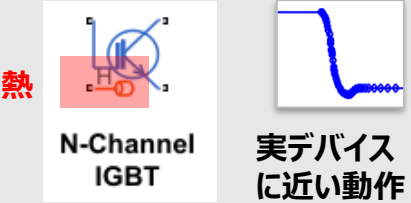
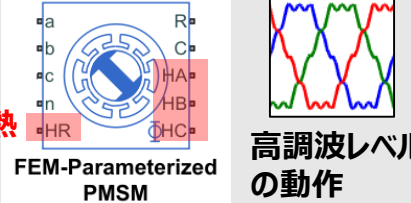
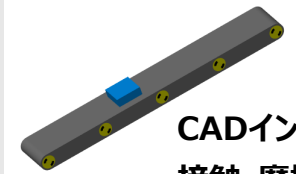
プラントモデリング

解析目的に応じて、適した詳細度のプラントモデルを構築して、それらを組合せて手早く検討できる

詳細度
低



高

制御装置 (IO) 	センサー (電流、角度、速度) 	駆動回路 (インバーター) 	モーター (ブラシレスDCモーター) 	負荷 (メカ) 
物理値 (電流) の真値 	物理値 (角度) の真値 	理想電圧源 	簡易モーター 	負荷トルク (時系列データ) 
簡易AD変換 (遅延) 	簡易角度センサー (遅延) 	簡易半導体素子 (理想) 	簡易3相モーター (理想) 	1Dメカ (マス・バネ・ダンパ) 
詳細AD変換 (分解能) 	詳細角度センサー (分解能) 	詳細半導体素子 (詳細) 	詳細3相モーター (詳細) 	3Dメカ (剛体・ジョイント) 

計算
速



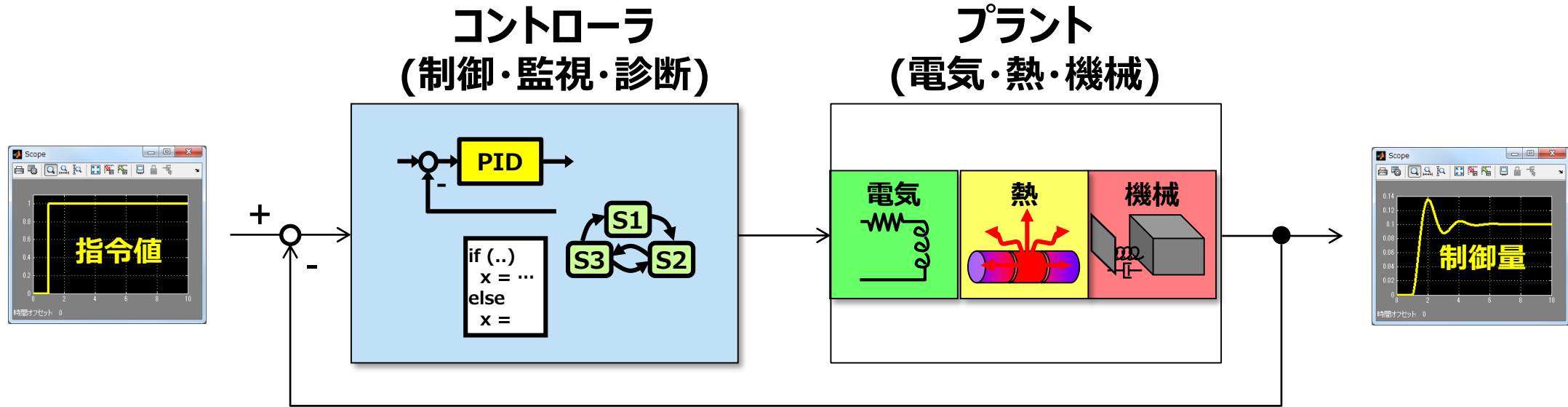
遅

制御設計

制御目的に応じて、豊富な制御手法の中から、適した手法を用いてコントローラ設計ができる

モーター制御のライブラリ	線形制御理論による補償器設計	最適化計算による自動チューニング	アドバンストな制御	ロジックベースの制御
<p style="text-align: center;">フィードバック制御系の設計</p>				<p style="text-align: center;">シーケンス制御系の設計</p>
<p style="text-align: center;">座標変換</p> <p style="text-align: center;">PWM発生器</p> <p style="text-align: center;">フィルター デッドタイム</p>	<p style="text-align: center;">補償器 (PID、-notchフィルタなど)</p> <p style="text-align: center;">補償器設計のUI (時間応答、周波数応答)</p>	<p style="text-align: center;">制御パラメータ全般</p> <p style="text-align: center;">パラメータ自動調整のUI (応答制約を満たすように最適化)</p>	<p style="text-align: center;">ゲインスケジューリング (各動作点で制御ゲインを切替)</p> <p style="text-align: center;">モデル予測制御 (プラントモデルで未来の挙動予測)</p>	<p style="text-align: center;">制御モードの切替</p> <p style="text-align: center;">状態遷移図のUI (遷移動作を動画で確認)</p>

プラントモデリング、制御設計に関連するMATLABプロダクト



制御設計	製品	プラントモデリング	製品
モーター制御のライブラリ	Simscape Power Systems™	電気系 (モーター、駆動回路、センサー、制御装置のIO)	Simscape™ Simscape Power Systems™ Simscape Electronics™
線形制御理論による補償器設計	Simulink Control Design™ Control System Toolbox™	熱系 (モーター、半導体デバイスの温度)	Simscape™
最適化計算による自動チューニング	Simulink Design Optimization™ Optimization Toolbox™	機械系 (モーターの出力軸の機械負荷) ・1D: マス、バネ、ダンパ ・3D: 剛体・ジョイント	Simscape™ ← 1D Simscape Driveline™ ← 1D Simscape Multibody™ ← 3D
ロジックベースの制御	Stateflow®		

※ 基本環境の MATLAB、Simulink® は必須

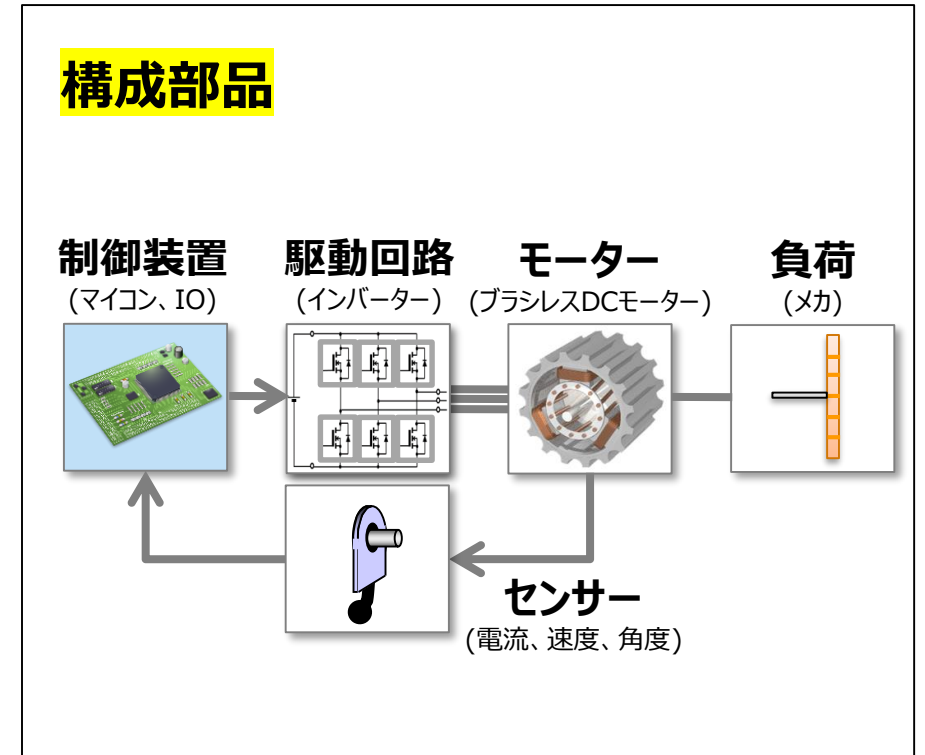
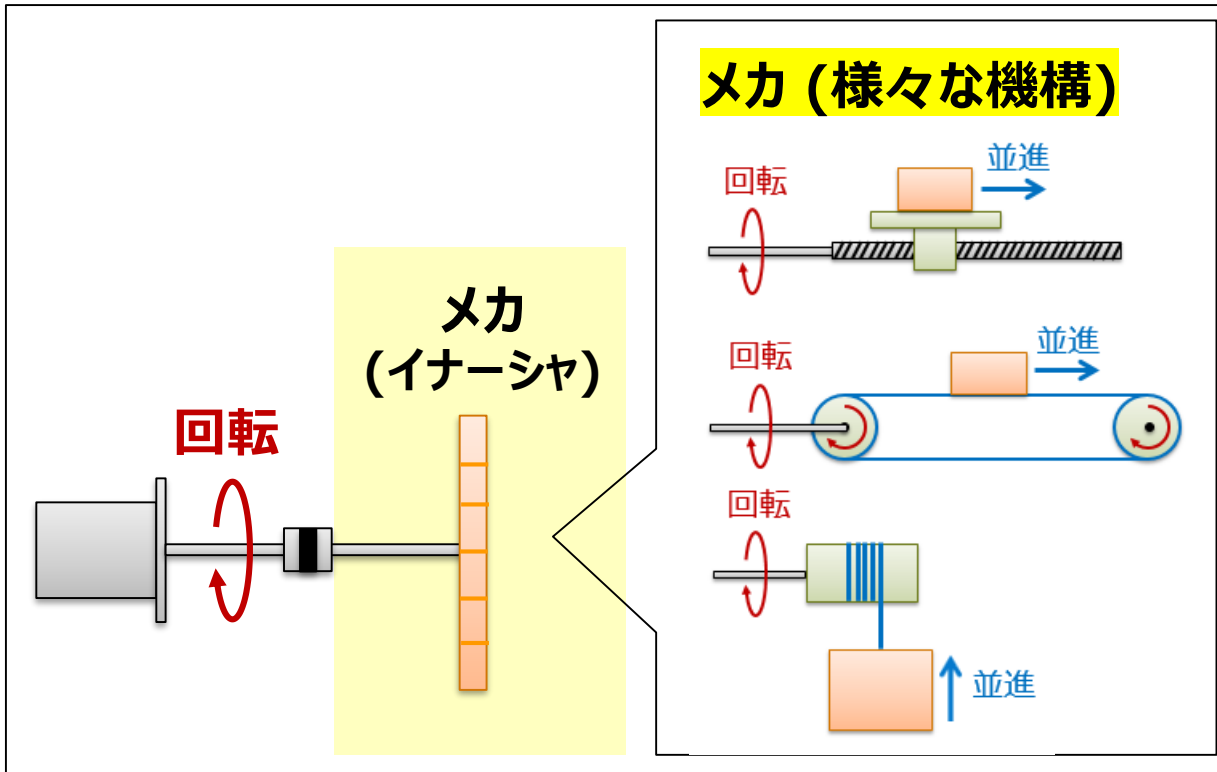
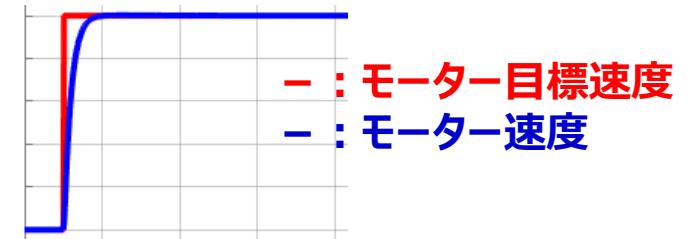
アジェンダ

- モーター制御の概要
- プラントモデリング、制御設計のMATLABソリューション
- 例題：速度制御システム
 - モーター制御のプラントモデリング、制御設計の基本フローを説明
- まとめ

例題: 速度制御システム

目的: 制御仕様を満たすように、ブラシレスDCモーターを利用したベクトル制御の設計を行う。

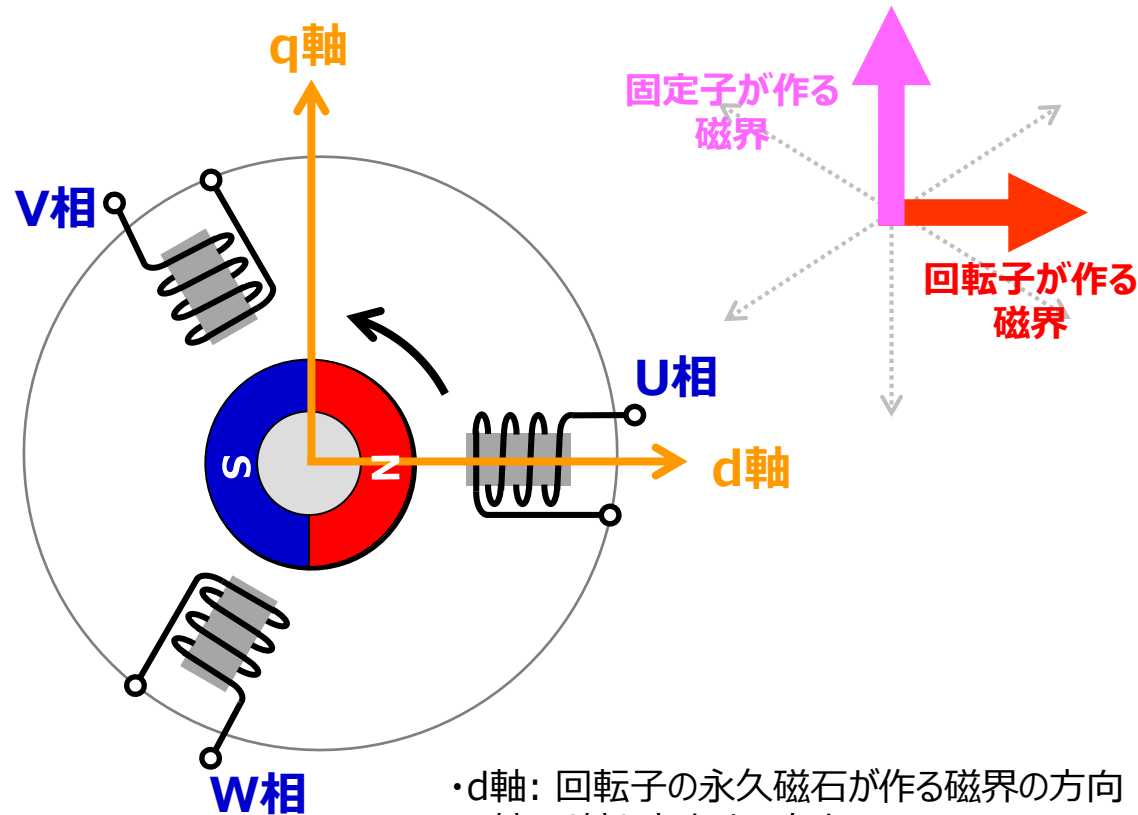
制御仕様	目標速度1,000[rpm]のステップ信号に対する応答指標
立ち上がり時間	20[msec]
オーバーシュート	5[%] (=1,000 + 50[rpm])



ブラシレスDCモーター（永久磁石同期モーター）のベクトル制御

仕組み

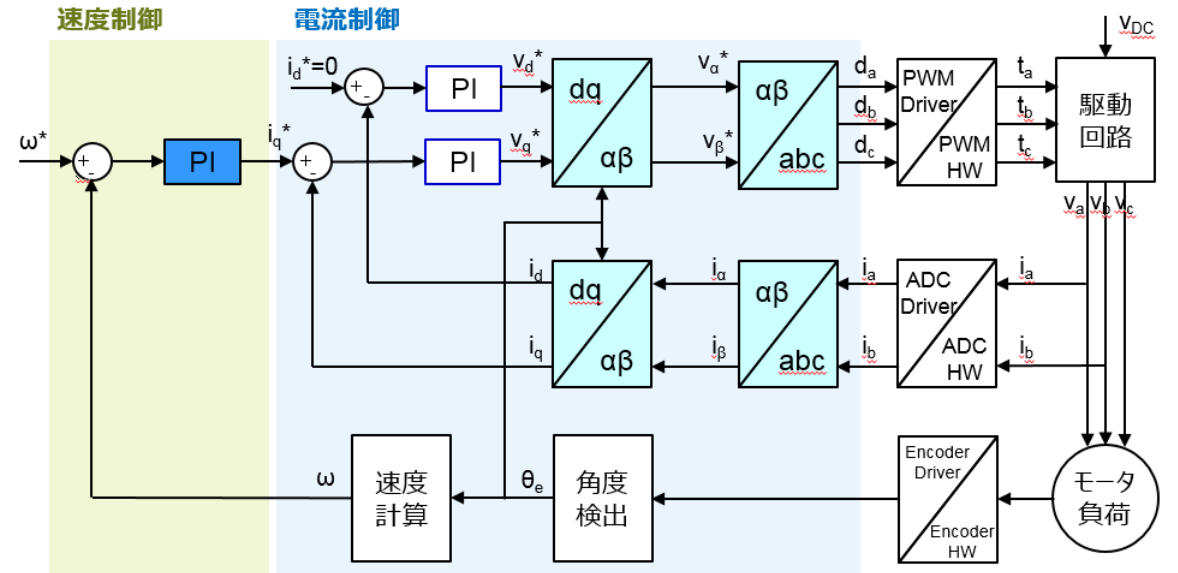
最大のトルクが得られるように、固定子のU,V,W相に流した電流が作る磁界のベクトルを合成して、回転子の永久磁石のq軸方向に磁界を与える。



- d軸: 回転子の永久磁石が作る磁界の方向
- q軸: d軸と直交する方向

良い所

直交しないU、V、W相でq軸方向の磁界を作るのは大変。直交するdq軸だと、電流・磁界を直流量で取り扱えるので、q軸方向に容易に磁界を与えられる。(制御で扱い易い。)



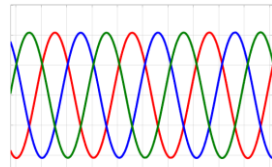
ただし、システムに応じて制御パラメータのチューニングが必要。

- 電気系: dq軸電流制御 (PI制御) のゲイン
- 機械系: 速度制御 (PI制御) のゲイン

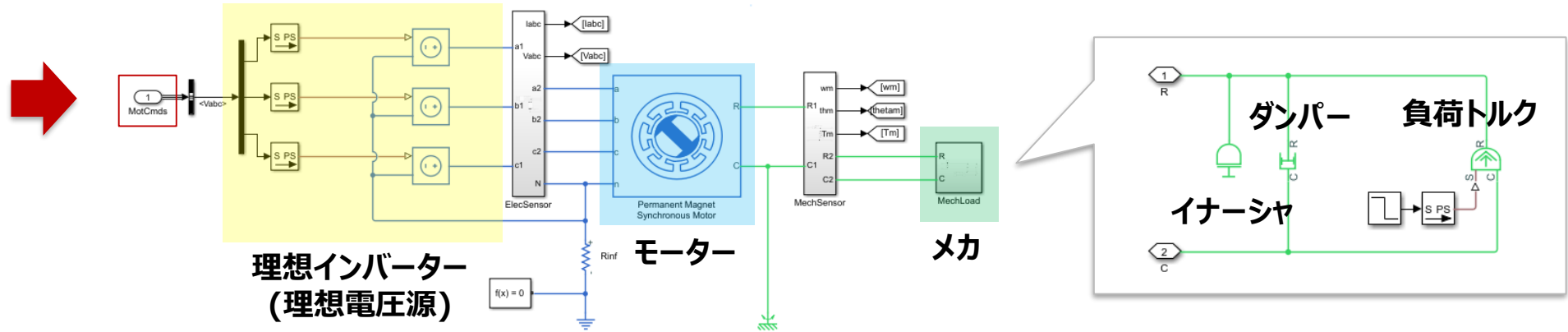
プラントモデリングフロー

STEP.1

目的	モーターを使ったシステムの物理現象の把握 + ベクトル制御を用いた速度制御の理論検証
モデリングの方針	メカの速度制御を設計するので、機械系はダイナミクスを考慮し、電気系は簡易モデルとする

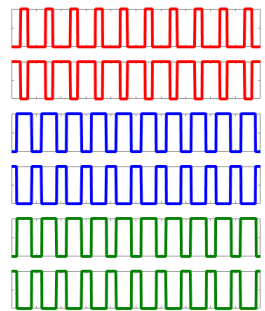


3相電圧

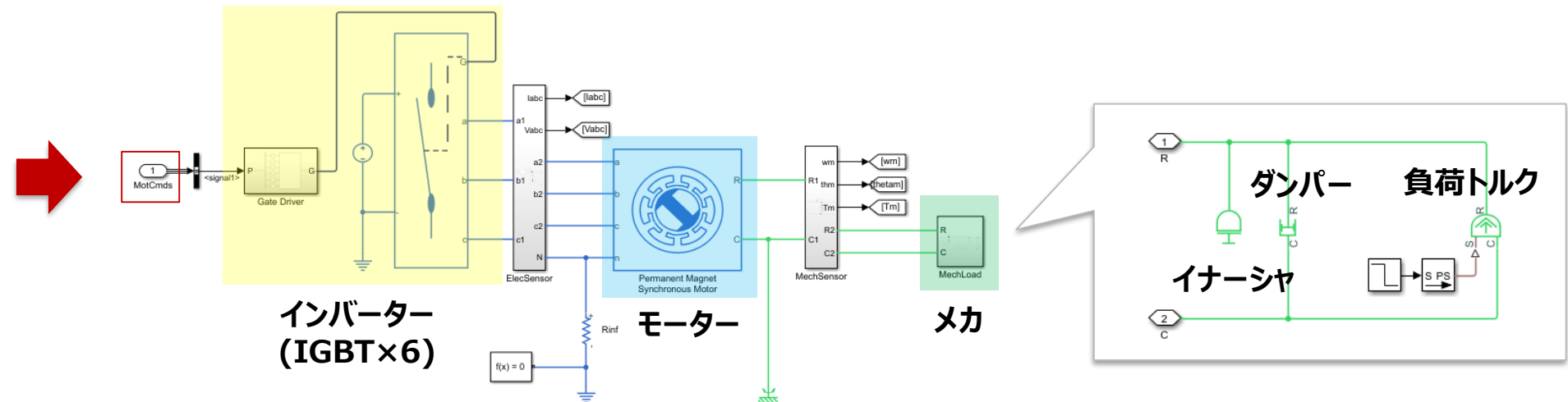


STEP.2

目的	実システムで発生する遅延・誤差の影響を考慮したときの制御性能の検証、パラメータ微調整
モデリングの方針	電気回路レベルで制御性能を確認するので、電気系は半導体デバイスを含む詳細モデルとする

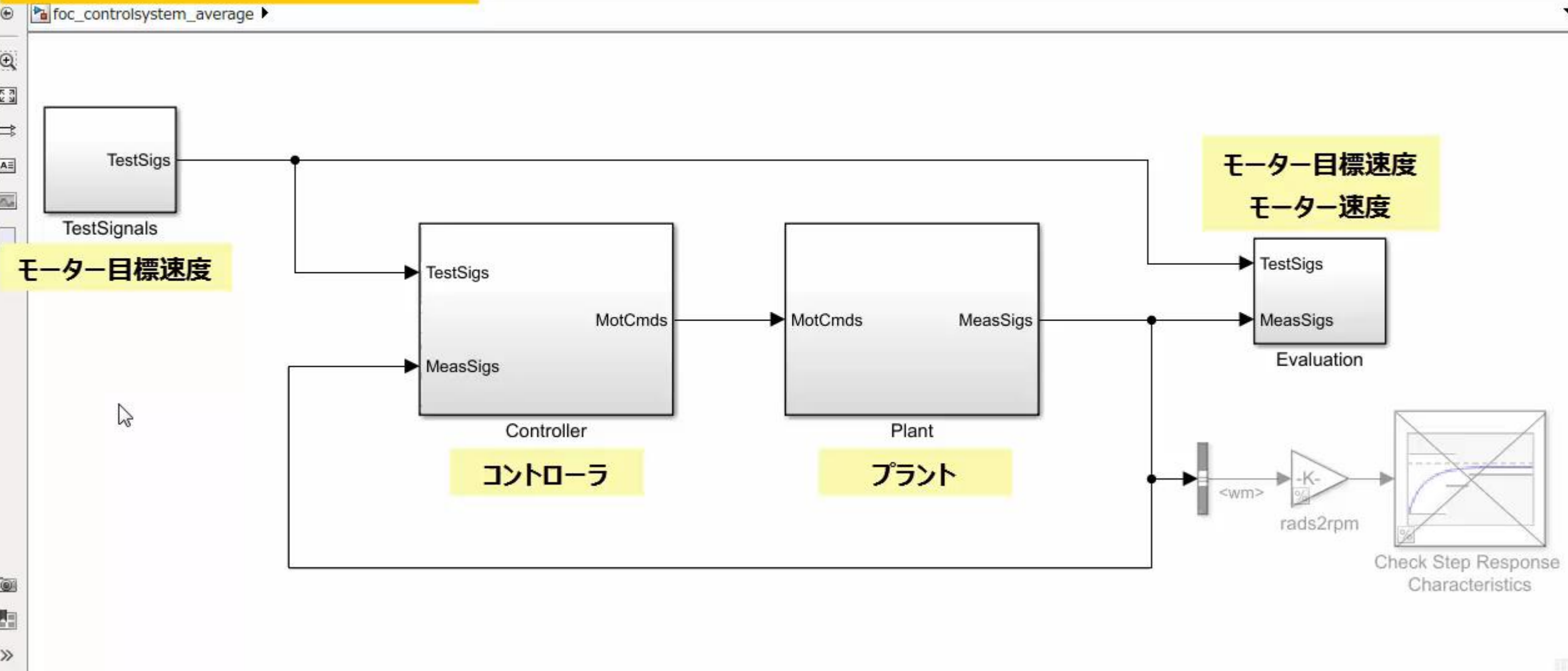


ゲート信号 (×6)



モーターの速度制御システム

STEP.1 電気系：簡易モデル



制御設計フロー

ツール機能

制御系定義

制御対象解析

制御性能要件定義

制御方式設計

電流制御設計

速度制御設計

性能評価・解析

制御対象特性解析

- ・ 入出力間の時間/周波数応答解析
- ・ 線形時不変モデルの抽出

制御モデリング

- ・ PID制御器
- ・ 座標変換 (2相-3相、回転-静止)
- ・ 同期/非同期モーター制御器など

制御器自動調整

- ・ PID制御による性能要件出し
- ・ PID制御ゲインの当り付け
- ・ 性能要件に対する自動適合

動的システムモデル簡易化

- ・ 線形時不変モデルの低次元化

線形解析ツール
Simulink Control Design

ブロック線図モデリング
Simulink

モーター制御汎用モデル
Simscape Power Systems

PID調整器
Simulink Control Design

応答最適化ツール
Simulink Design Optimization

制御システム調整器
Simulink Control Design

モデルリデューサ
Control System Toolbox

モデルから制御対象の動特性を理解 → 制御方式の設計に役立てることができる

設計者入力

解析入出力

任意の入出力（開/開ループ）

解析手段

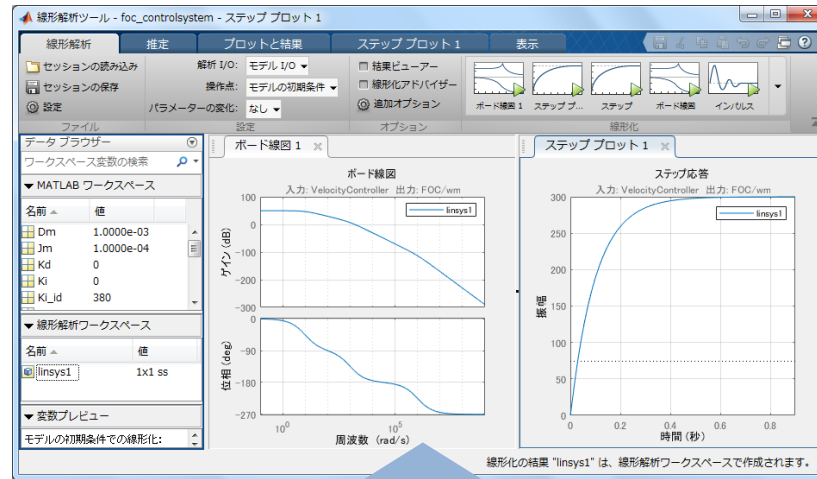
指定した入出力間の線形化モデルの応答

時間/周波数応答

- ステップ
- インパルス
- ボード線図
- ナイキスト線図
- ニコルス線図
- 特異値
- 極/零点

線形解析ツール

Simulink Control Design



出力

解析結果

制御対象の動特性

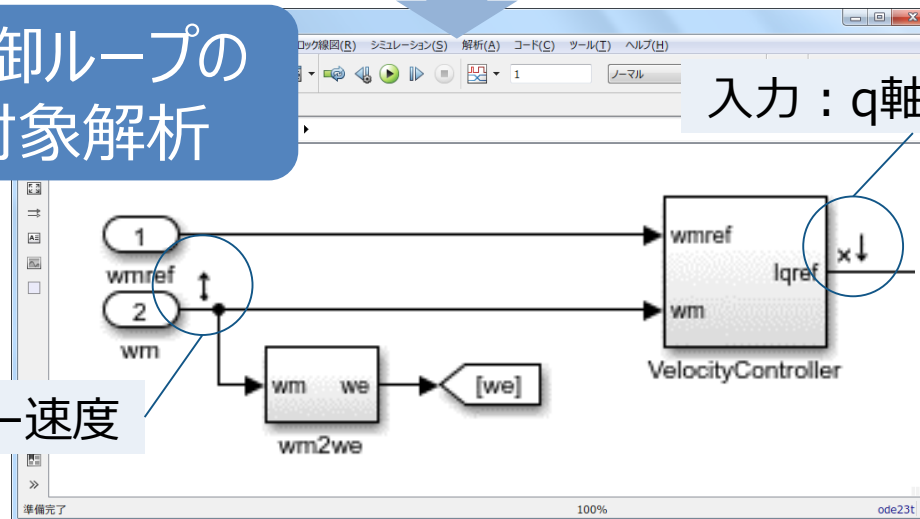
数式モデル

線形時不変モデル

速度制御ループの
制御対象解析

入力：q軸電流指令

出力：モーター速度



モデル線形化技術



充実した制御ライブラリ → 制御方式を素早く具現化できる

Simulink ライブラリ

モーター制御アルゴリズムのモデリングに必要なブロックを提供

Simulink

基本演算ライブラリ

- PID制御器、伝達関数、他

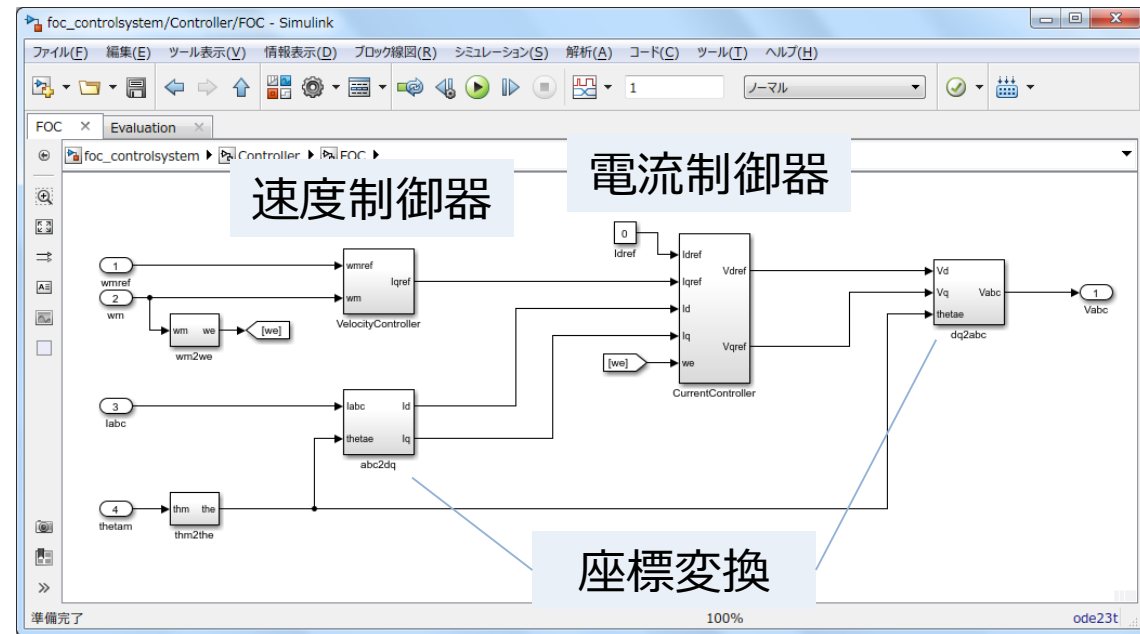
Simscape Power Systems

Control ライブラリ

- 座標変換 (2相-3相、回転-静止)
- PWM生成
- 汎用制御器
 - 同期/非同期
 - ブラシレスDC
 - コンバータ
- オブザーバ、他



ベクトル制御モデル



制御方式の例 :

- PID制御
- 非干渉制御
- 2自由度制御
- 外乱オブザーバ
- ノッチフィルタ

線形制御理論に基づく制御器の自動調整機能 → 制御方式の設計を効率化できる

設計者評価

PID調整器

出力

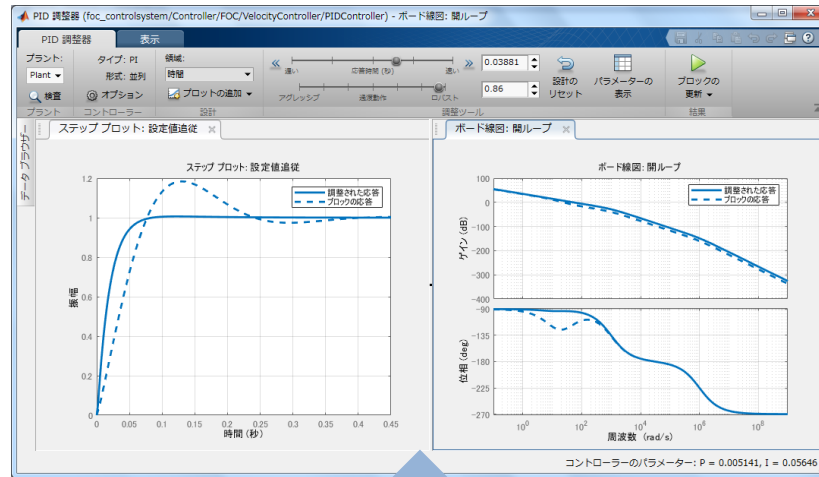
Simulink Control Design

制御性能

応答波形・性能指標を見ながら対話的にゲイン調整



対話的調整



調整後パラメータ値

コントローラのパラメータ		
	調整	ブロック
P	0.0051411	0.0014
I	0.056463	0.05
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a

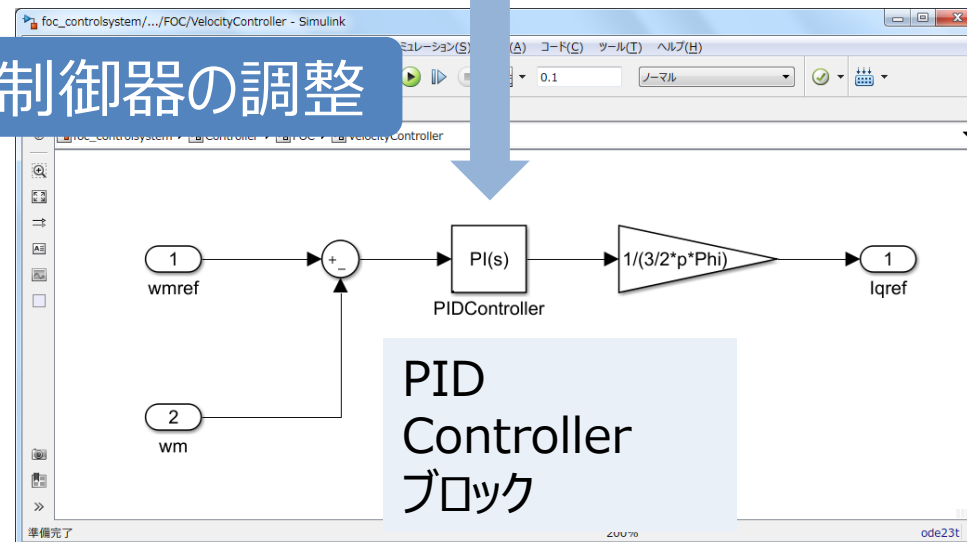
1. 時間/周波数応答

開ループ	制御対象
	一巡伝達関数
閉ループ	目標値追従
	制御器出力
	外乱抑制

2. 制御性能指標

立上り時間
整定時間
オーバーシュート
安定余裕、など

速度制御器の調整



PID Controller ブロック

ユースケース

- PID制御による性能要件出し
- PID制御ゲインの割り付け

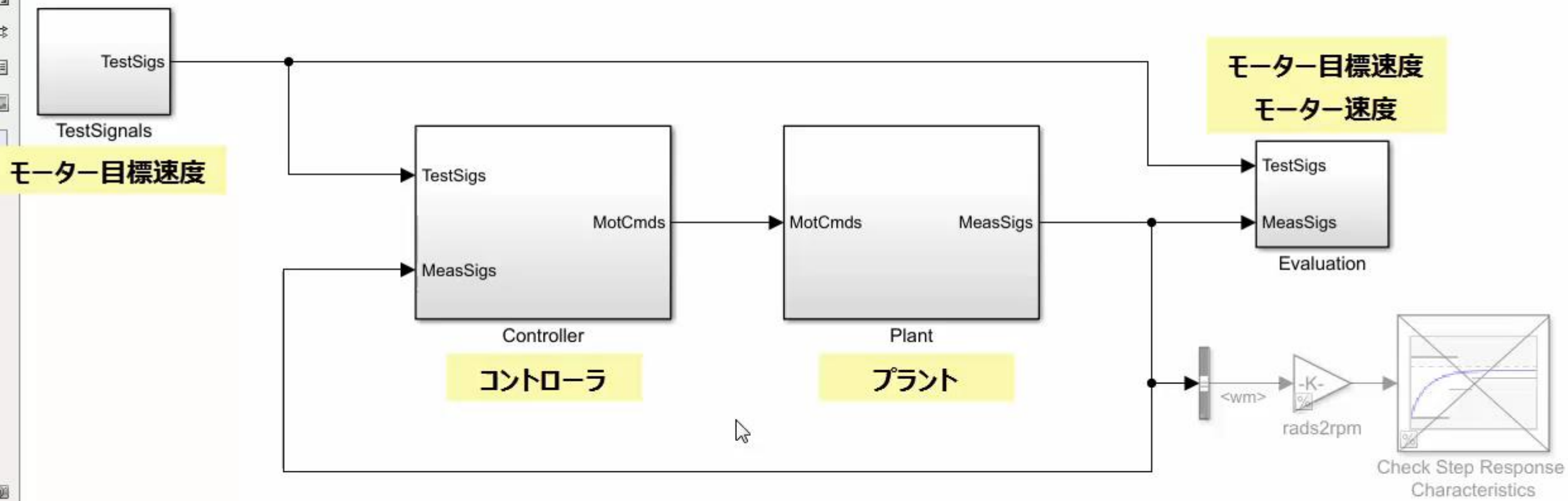
モデル線形化技術



モーターの速度制御システム

ベクトル制御のモデリング、速度制御 (PI制御) のゲインチューニング

foc_controlsyste...average



最適化計算に基づく制御器の自動調整機能 → 制御方式の設計を効率化できる

設計者入力

応答最適化ツール

出力

調整パラメータ

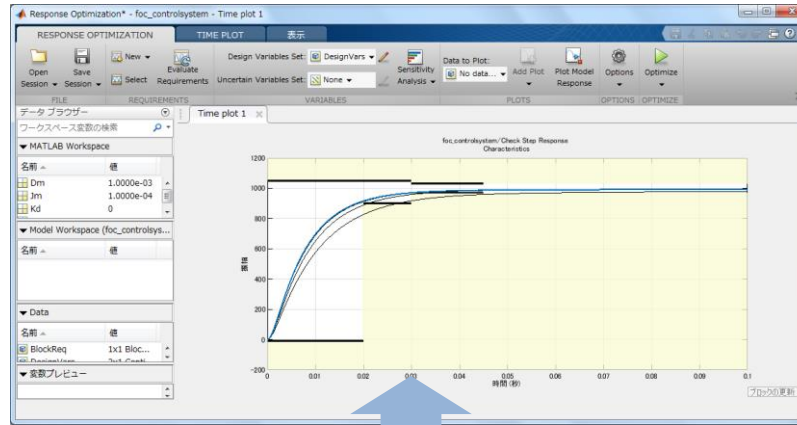
任意の制御定数

制御性能要件

時間/周波数応答

性能要件定義ブロック

Simulink Design Optimization



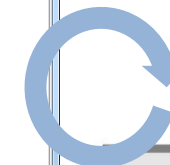
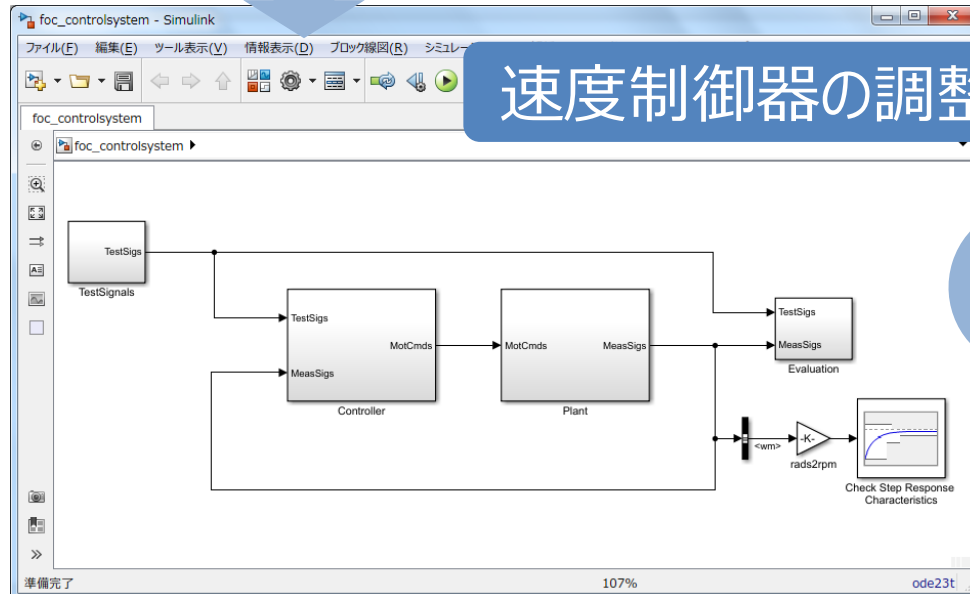
調整後パラメータ値

与えられた制御性能要件を満たすように自動適合

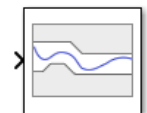
速度制御器の調整

※ 任意の制御モデル構造に適用可能

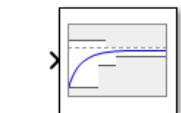
数値最適化技術
Optimization Toolbox



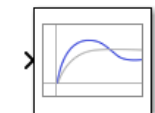
時間
応答



Check Custom Bounds



Check Step Response Characteristics



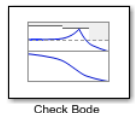
Check Against Reference

上下限

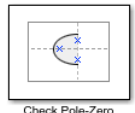
ステップ応答

目標軌道

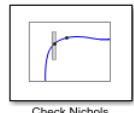
周波数
応答



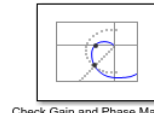
Check Bode Characteristics



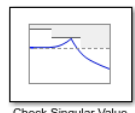
Check Pole-Zero Characteristics



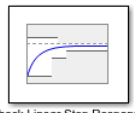
Check Nichols Characteristics



Check Gain and Phase Margins



Check Singular Value Characteristics



Check Linear Step Response Characteristics

ゲイン上限、極配置、安定余裕など

アジェンダ

- モーター制御の概要
 - プラントモデリング、制御設計のMATLABソリューション
 - 例題：速度制御システム
 - モーター制御のプラントモデリング、制御設計の基本フローを説明
- まとめ

まとめ

- **本Webセミナーの説明内容の振り返り**

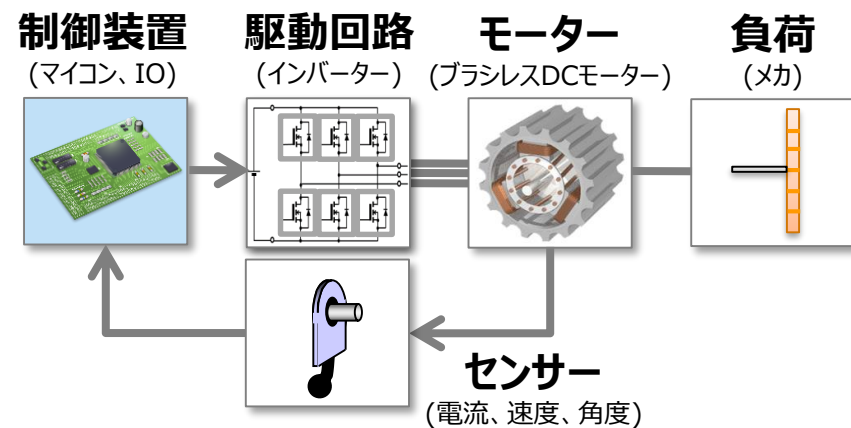
- ✓ ブラシレスDCモーターを効率良く回すベクトル制御を例題に、MATLABプロダクトを使ったプラントモデリング、制御設計の基本フローを紹介。

- **MATLABプロダクトの強み**

- ✓ Simulinkは、この基本フローを網羅して効率的に作業が行える環境を提供。
- ✓ モーター制御のトレンドと課題への取り組みを促進。



モーター制御の開発で、
MATLABプロダクトを是非ご活用下さい。



関連情報

- **製品紹介ページ**
 - **Simscape (複合物理領域のプラントモデリング)**
<https://jp.mathworks.com/products/simscape.html>
 - **Simulink Control Design (線形制御理論による補償器設計)**
<https://jp.mathworks.com/products/simcontrol.html>
 - **Simulink Design Optimization (最適化計算による自動チューニング)**
<https://jp.mathworks.com/products/sl-design-optimization.html>
 - **Stateflow (ロジックベースの制御)**
<https://jp.mathworks.com/products/stateflow.html>
 - **その他のプロダクト**
<https://jp.mathworks.com/products.html>

関連情報

- **オンデマンドWebセミナー**

- **今からはじめるSimulink入門**

- <https://jp.mathworks.com/videos/introduction-to-simulink-120092.html>

- **新Simscapeプロダクトファミリーのご紹介 (R2016a)**

- <https://jp.mathworks.com/videos/introduction-to-new-simscape-product-family-r2016a-119416.html>

- **PID制御をSimulinkでより簡単に**

- <https://jp.mathworks.com/videos/pid-control-in-simulink-made-easy-94294.html>

- **Stateflowで状態遷移設計をより便利に**

- <https://jp.mathworks.com/videos/introduction-of-stateflow-106650.html>

関連情報

- **無料製品評価版 (30日間)**
https://www.mathworks.co.jp/programs/trials/trial_request.html
- **技術トレーニングサービス (有償)**
<http://www.mathworks.co.jp/services/training/index.html>



Accelerating the pace of engineering and science

© 2018 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.