IPMSMの弱め磁束制御による最適なトルク制御のキャリブレーション

MathWorks Japan
アプリケーションエンジニアリング部

はじめに

<u>本セミナーの対象者</u>

- モーター制御開発者
- モーター適合エンジニア

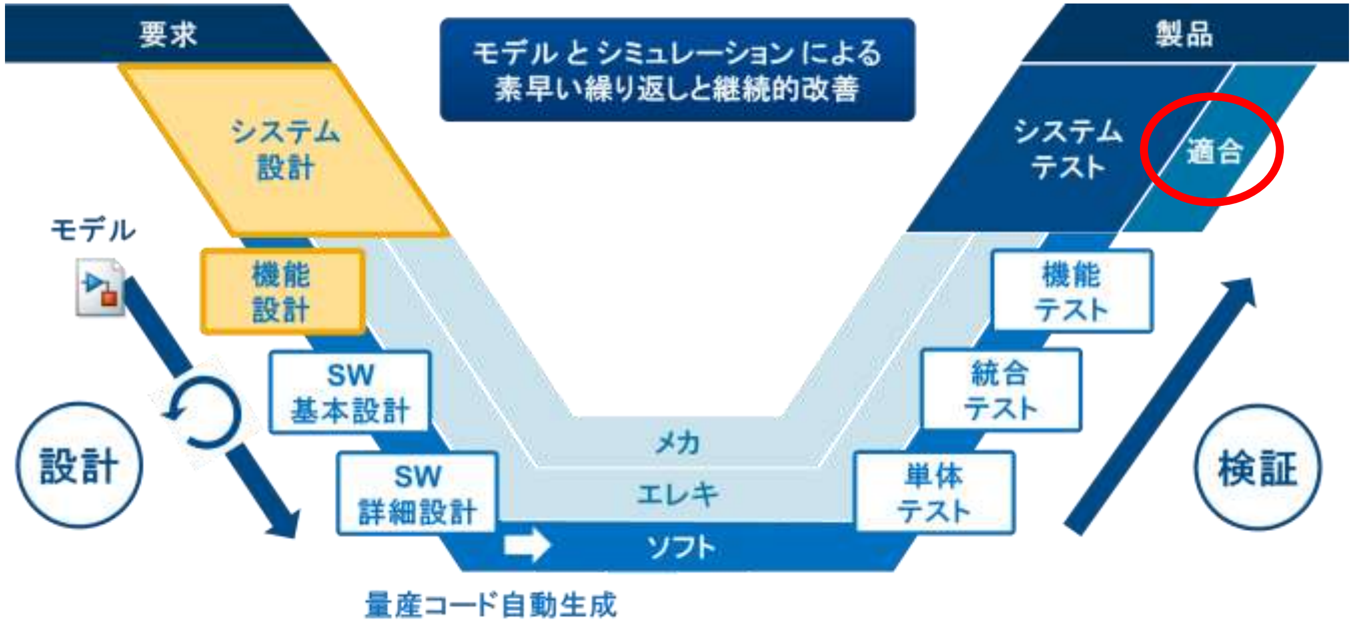
<u>本セッションでお伝えしたいこと</u>

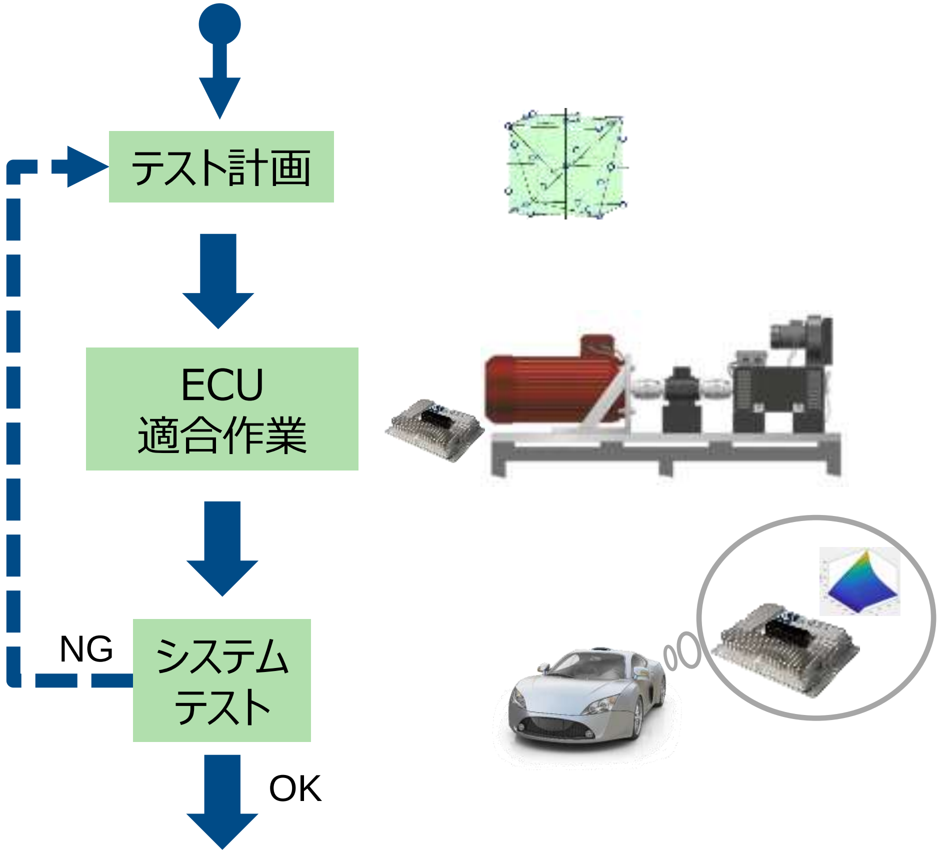
Model-Based Calibration Toolboxを活用した
モーターのトルク制御マップのキャリブレーション方法

モーターを使用した様々な電動機器

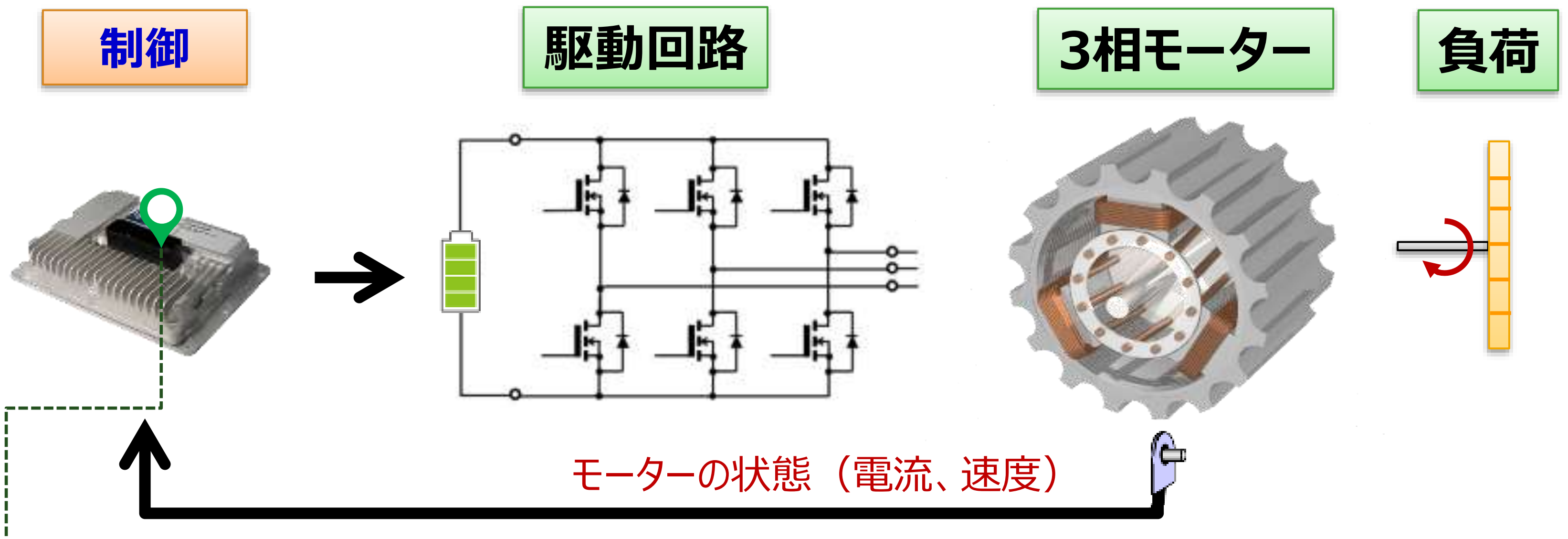
キャリブレーション（適合）とは

要求性能に対して、制御パラメータを最適化すること。
⇒ モーターの要求出力を満たすために、制御パラメータが最適値になるよう調整

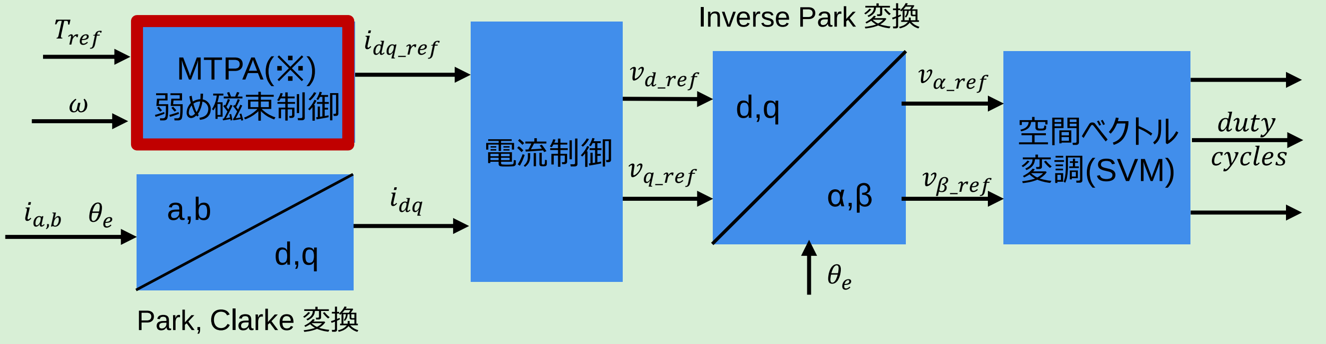




モーターシステムの構成

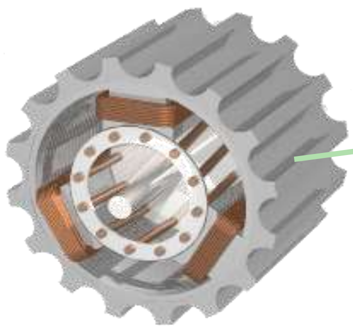


[制御アルゴリズム]



※MTPA : Maximum Torqe Per Ampere

弱め磁束制御とは？



d-q座標軸上で表現したPMSMの電圧方程式

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{d_t} - \omega_e L_q i_q$$

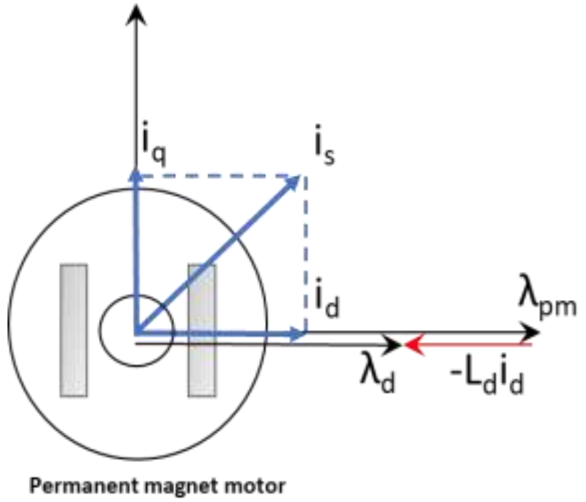
$$v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e L_d I_d + \omega_e \lambda_{pm}$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{pm} \qquad \lambda_q = L_q i_q$$

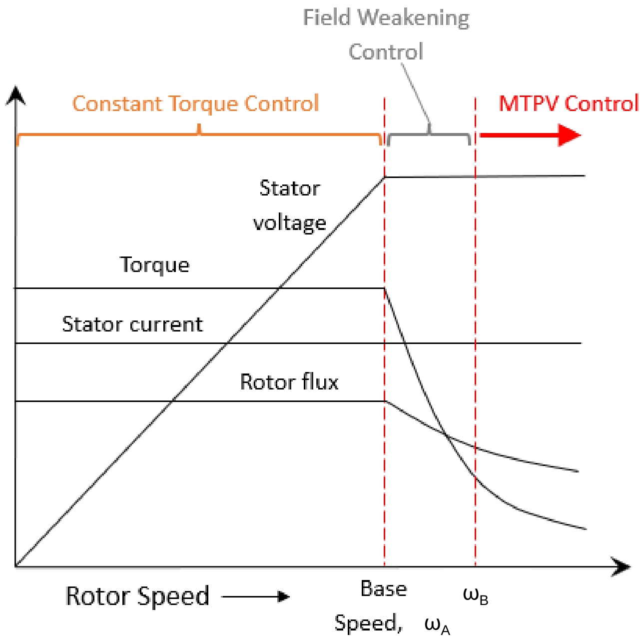
トルク式

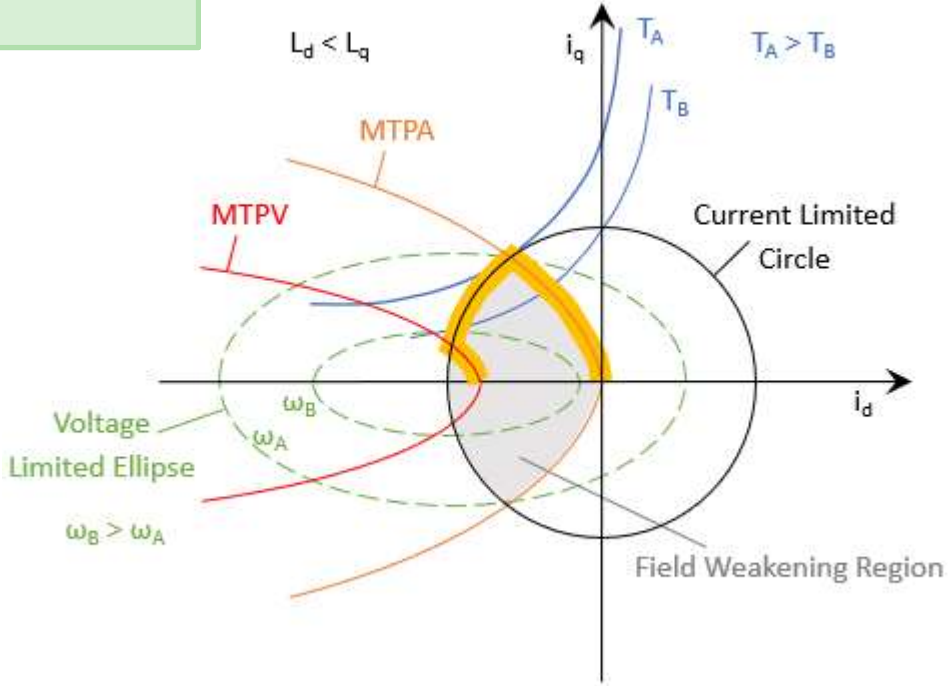
$$T = 1.5p[\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

- v_d, v_q: 電気子電圧のd,q軸成分
- L_d: d軸インダクタンス
- L_q: q軸インダクタンス
- R_s: 電気子巻線抵抗
- i_d, i_q: 電気子電流のd,q軸成分
- ω_e: 電気角速度
- λ_{pm}: 永久磁石の鎖交磁束
- $\lambda_d \lambda_q$: 鎖交磁束のd,q軸成分
- p: 極対数



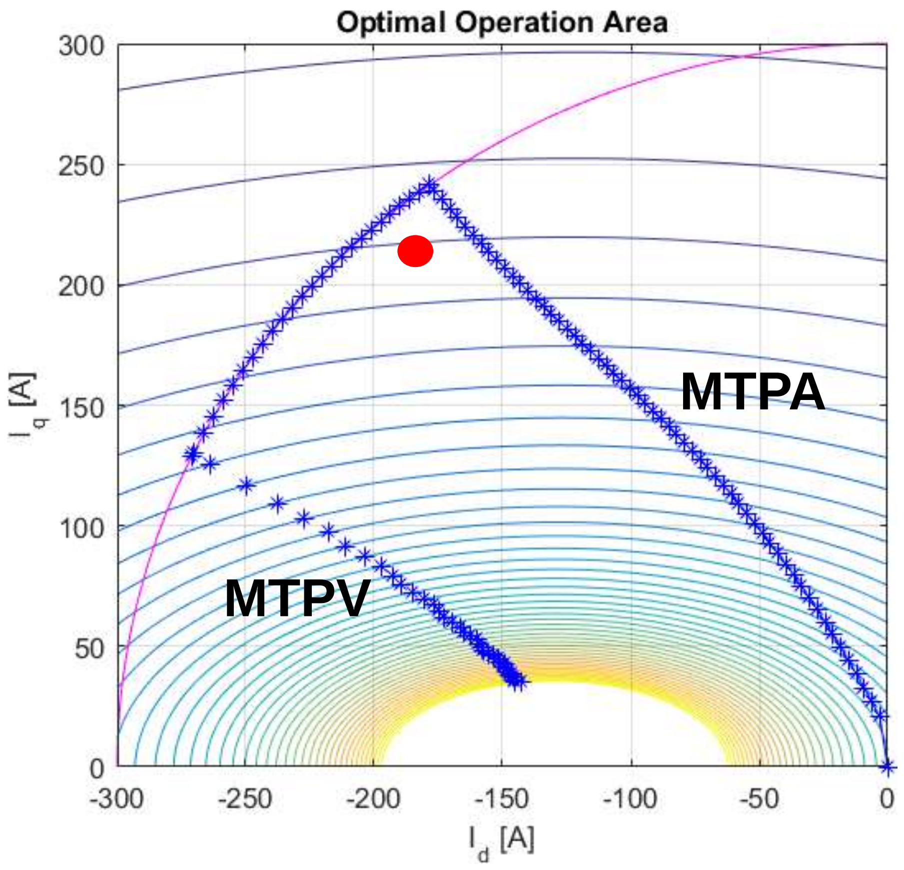
Link



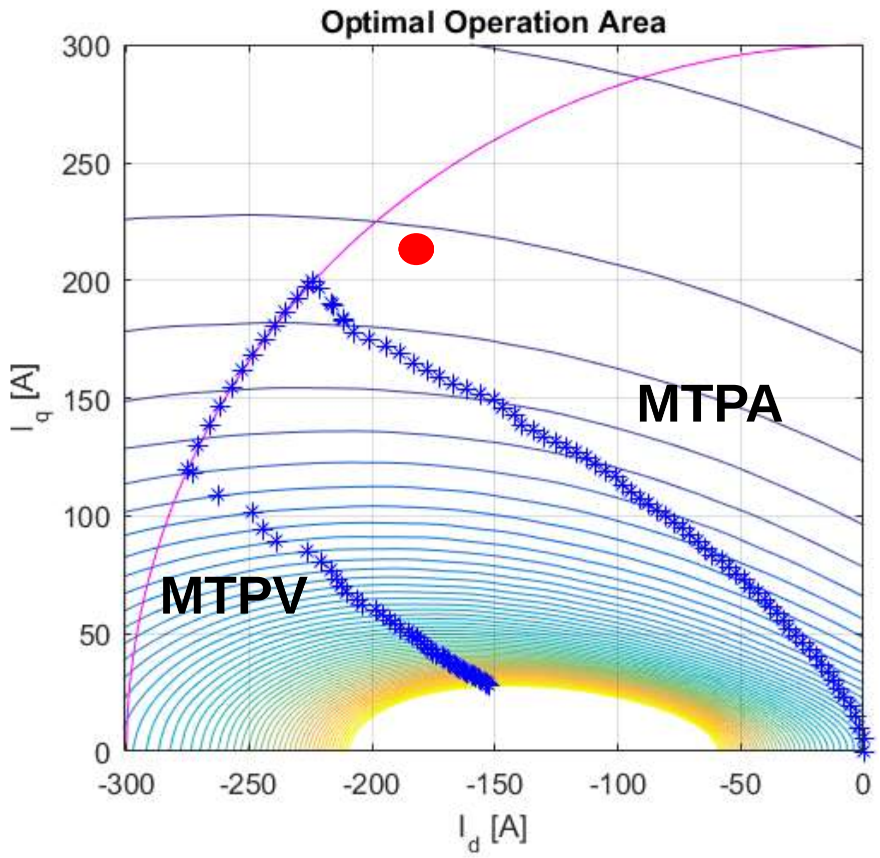


IPMSMの動作領域図

弱め磁束制御における飽和の影響



線形モデル

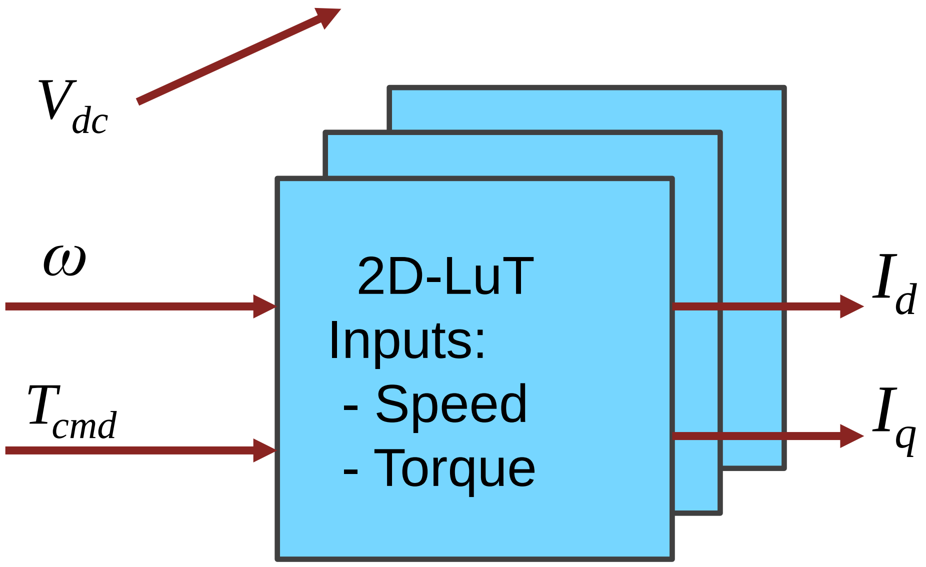


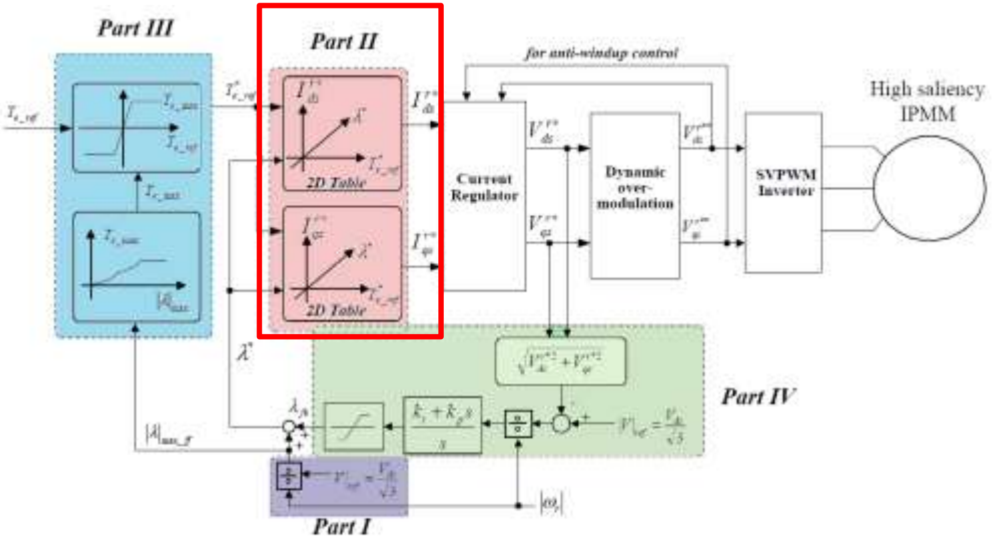
ダイナモテストによる軌跡

線形IPMSMのパラメータから計算される最適な弱め磁束点は、磁気飽和により実際のモータに適用できない場合があります。

弱め磁束制御のルックアップテーブル アルゴリズム

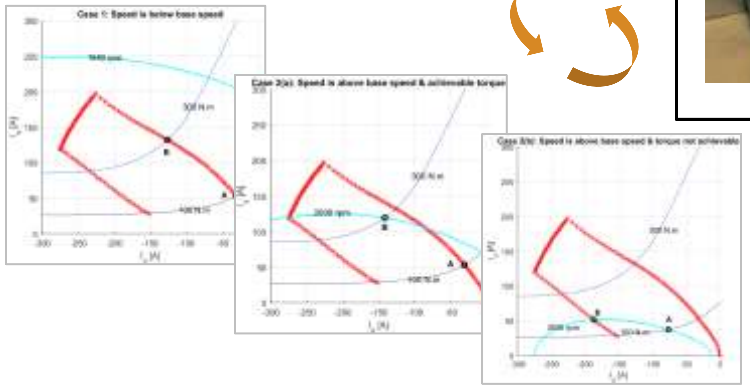
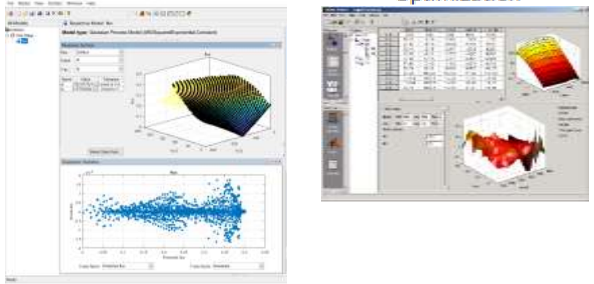
- 速度ベースのトルク制御テーブル
- 最大磁束ベースのトルク制御テーブル





Reference: Bon-Ho Bae, Patel N., Schulz, S., Seung-Ki Sul , “New Field Weakening Technique for High Saliency Interior Permanent Magnet Motor” 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, Vol. 2, pp.898-905, 2003.

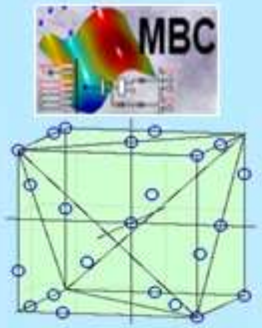
キャリブレーションの手法

アプローチ方法	ルールベース手法（従来）	モデルベース手法(MBC)
概要	テストベンチ上で、手動にて最適点を探索する手法  	複雑な非線形システムをモデル化してキャリブレーションするための手法 MBC Model Fitting MBC Optimization 
時間とコスト	ベンチのリソースとエンジニアが拘束され時間がかかる	データ収集後は、オフラインで処理するので、エンジニアの時間を節約し、プロジェクトを合理的に進めることができる
キャリブレーションの質	エンジニアの経験値に左右される	品質が保証され、技術者の未熟さに影響されることがない

Model-Based Calibration（MBC）のワークフロー

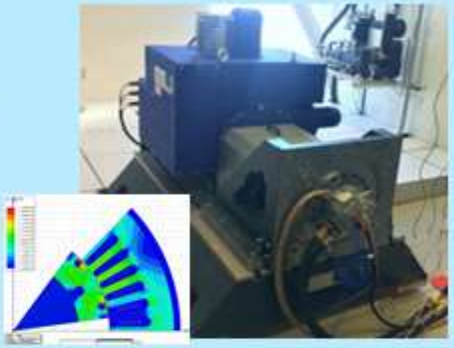
テスト計画

操作点の設計
計測器
インターフェース
DoE



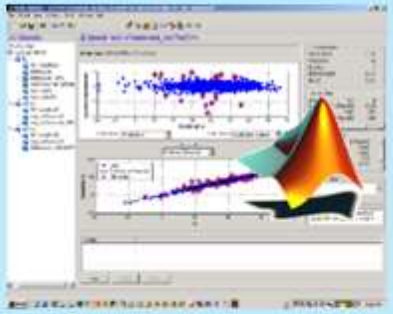
テスト実施

操作点の設定
実機準備
データ計測



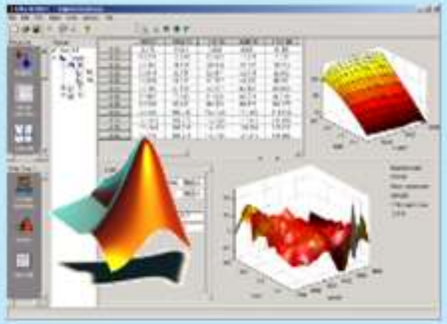
モデリング

データ前処理
統計モデル作成

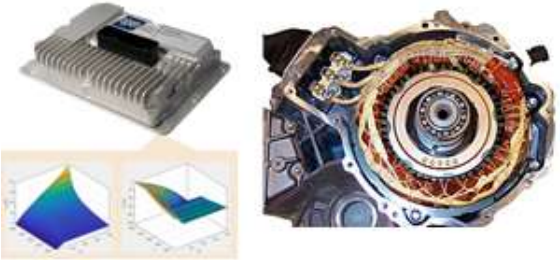


キャリブレーション

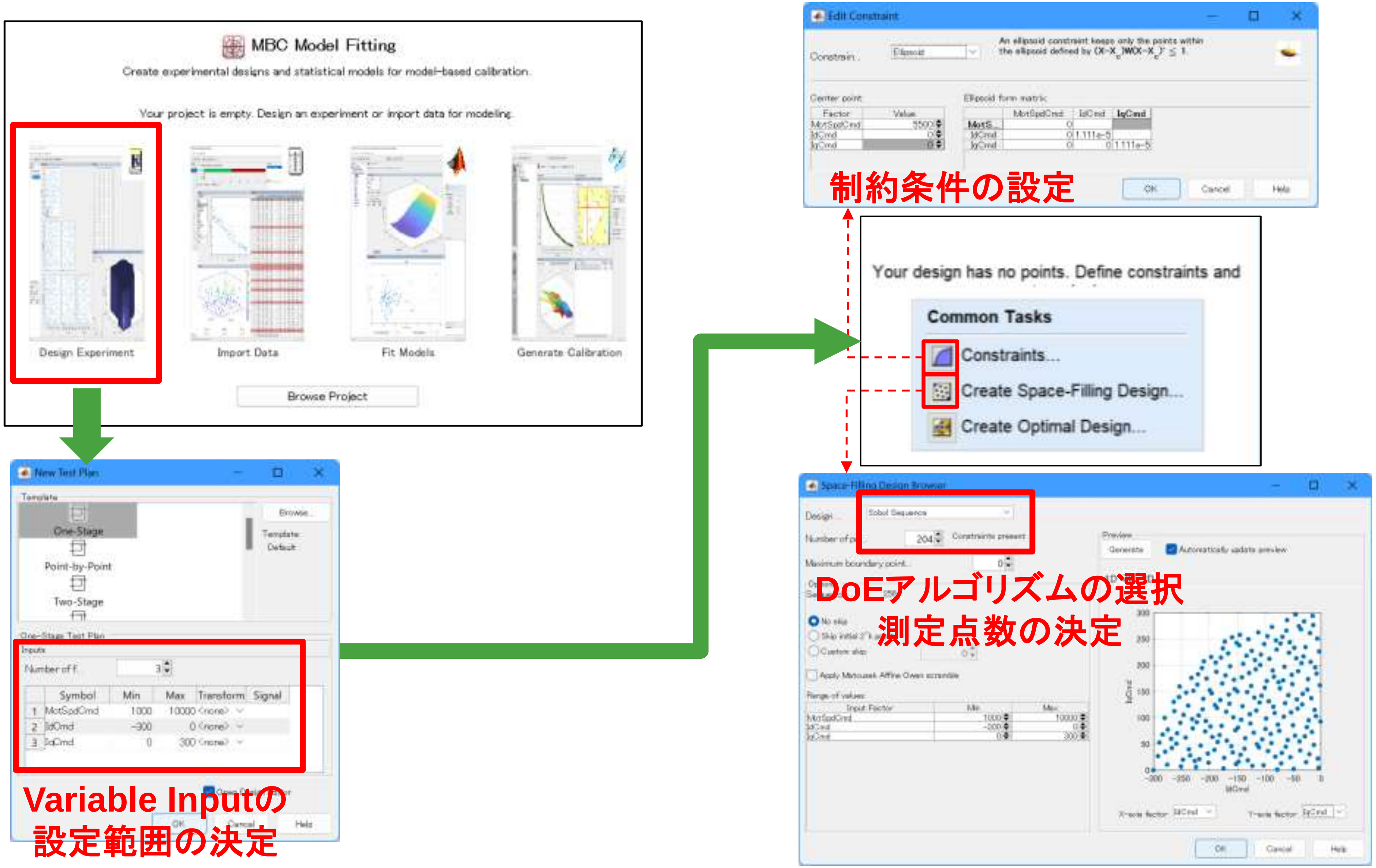
目的関数の設定
制約条件の設定
最適化



実装



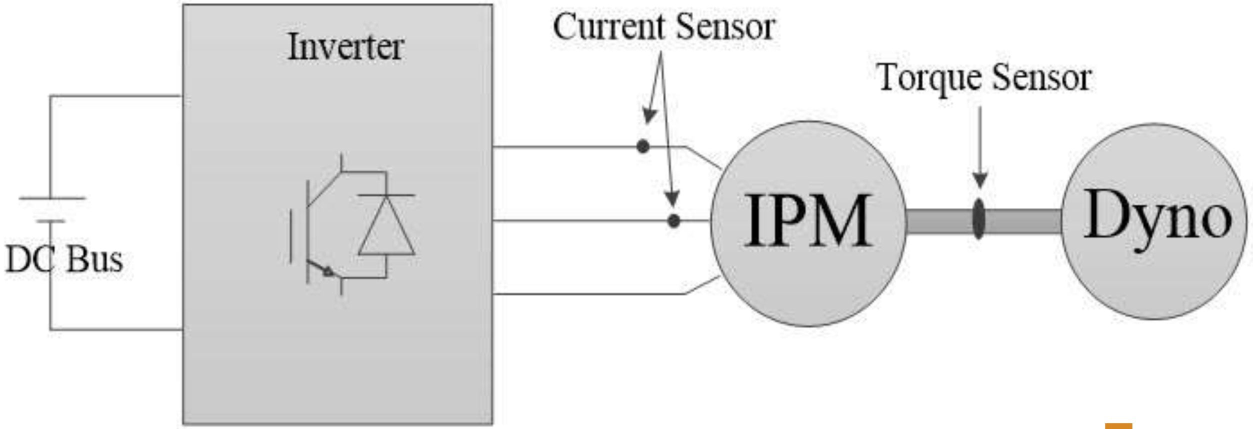
テスト計画：DoE試験計画



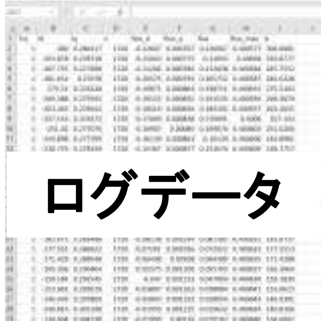
Design Table

	MotSpdCmd	IdCmd	IqCmd
1	1000	−300	0
2	5500	−150	150
3	3250	−75	75
4	2125	−112.5	262.5
5	6625	−262.5	112.5
6	4375	−187.5	187.5
7	8875	−37.5	37.5
8	1562.5	−18.75	206.25
9	6062.5	−168.75	56.25
10	8312.5	−93.75	131.25
11	2687.5	−206.25	93.75
12	7187.5	−56.25	243.75
13	4937.5	−131.25	18.75
14	1281.25	−140.625	121.875
15	3531.25	−215.625	46.875
16	8031.25	−65.625	196.875
17	2406.25	−253.125	159.375
18	6906.25	−103.125	9.375
19	4656.25	−28.125	234.375
20	9156.25	−178.125	84.375
21	1843.75	−159.375	253.125
22	6343.75	−9.375	103.125
23	4093.75	−84.375	178.125
24	8593.75	−234.375	28.125
25	2968.75	−46.875	65.625
26	7468.75	−196.875	215.625
27	1140.625	−60.938	285.938
28	5640.625	−210.938	135.938
29	7890.625	−135.938	60.938
30	2265.625	−173.438	23.438
31	6765.625	−23.438	173.438
32	4515.625	−98.438	98.438

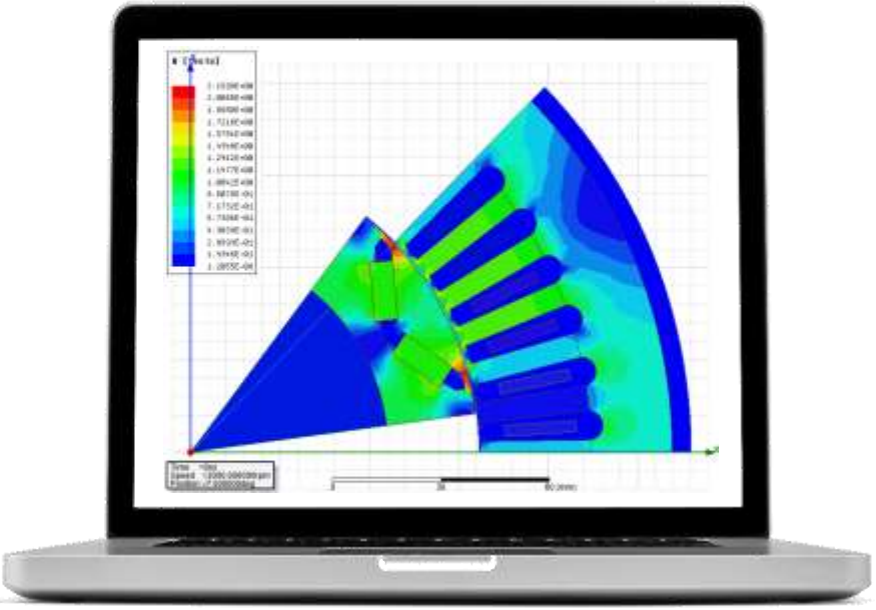
テスト実施：データ採取 (PMSM の特性評価)



ダイナモメータ



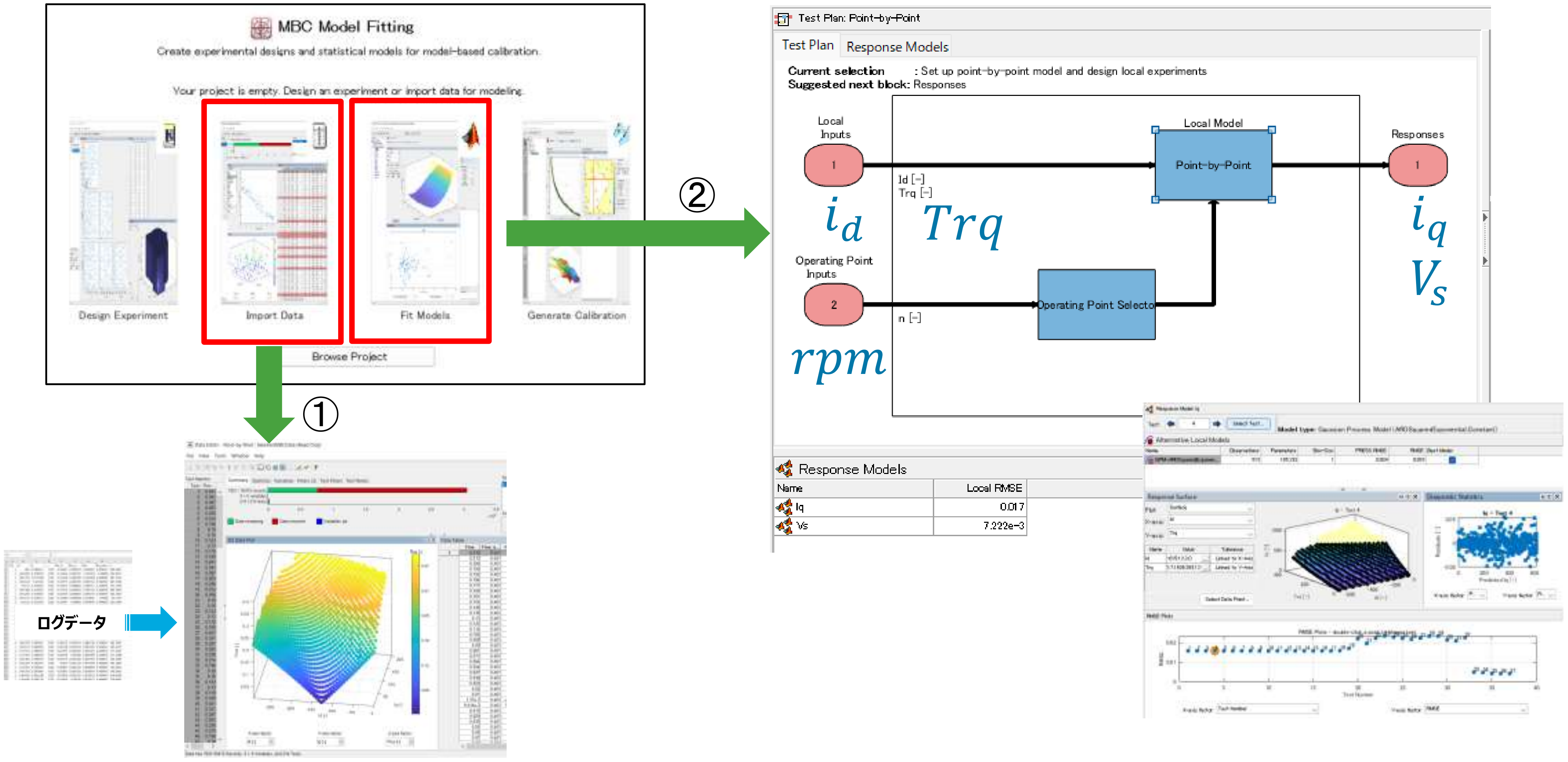
ログデータ



FEA

Reference: D. Hu, “Designing a Torque Controller for a PMSM through Simulation on a Virtual Dynamometer”, MathWorks technical article.
https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/designing-a-torque-controller-for-a-pmsm-through-simulation-on-a-virtual-dynamometer.html

モデリング：統計モデルの作成



キャリブレーション

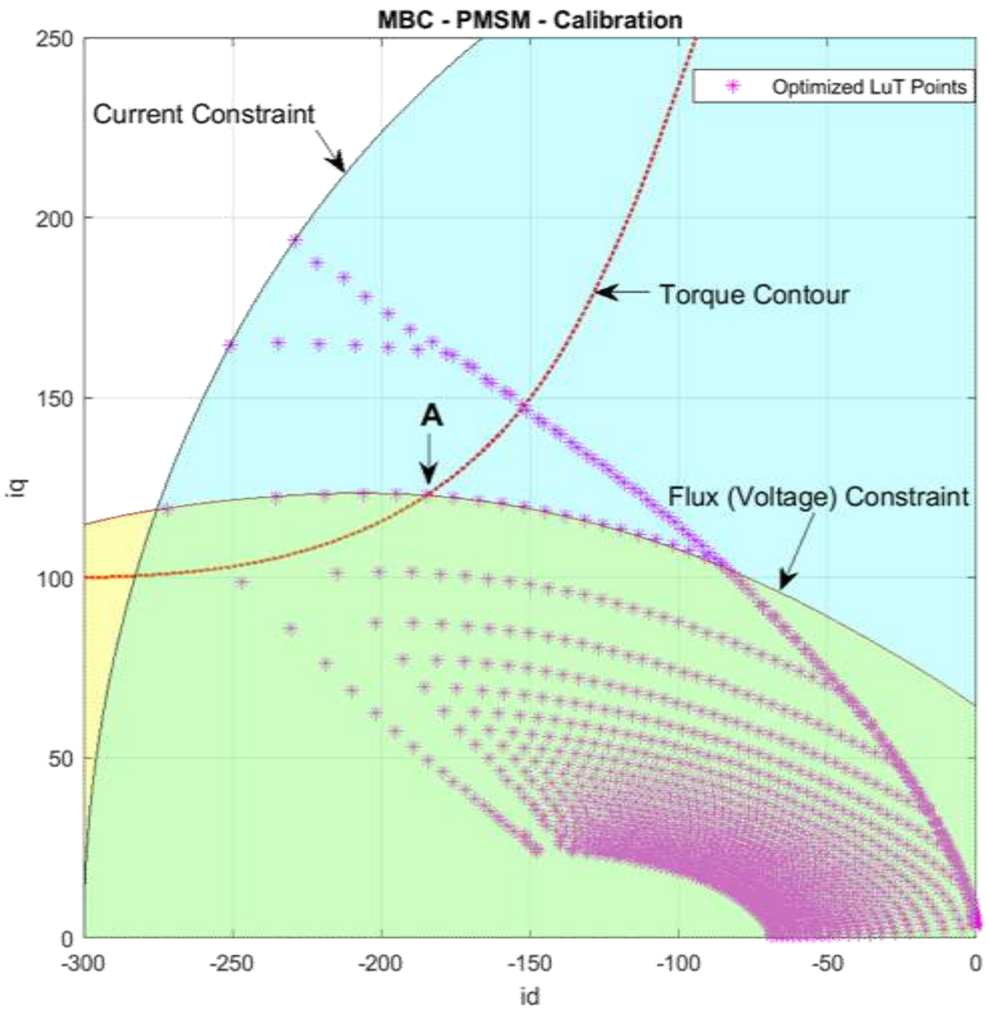
作成したモデルを使用し、物理的制約を満たしながら、
設定した最適化目標を達成できる(I_d, I_q)動作点を探索する

< 目的関数 >

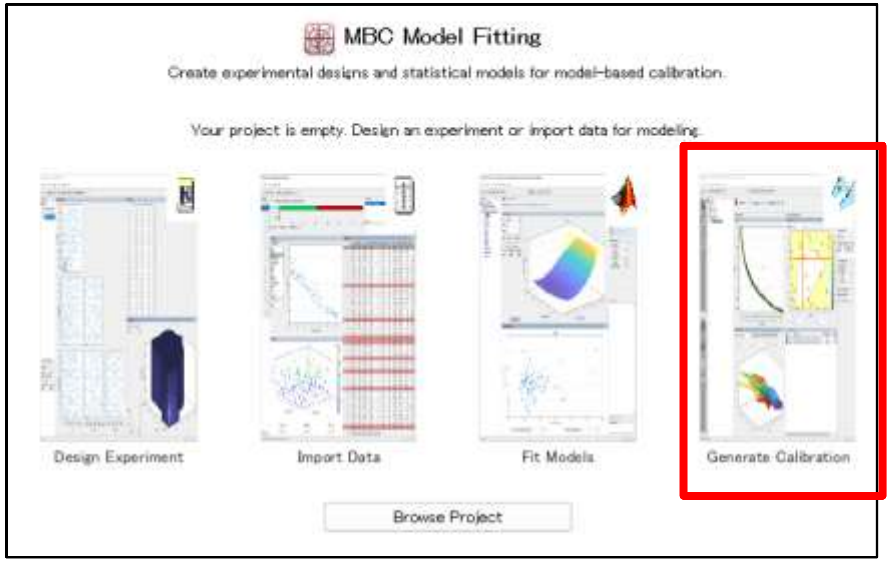
$$\mathrm{MTPA} = \max\ \left(\frac{Torque}{I_s}\right)$$
$$= \max\ f(I_d, I_q)$$

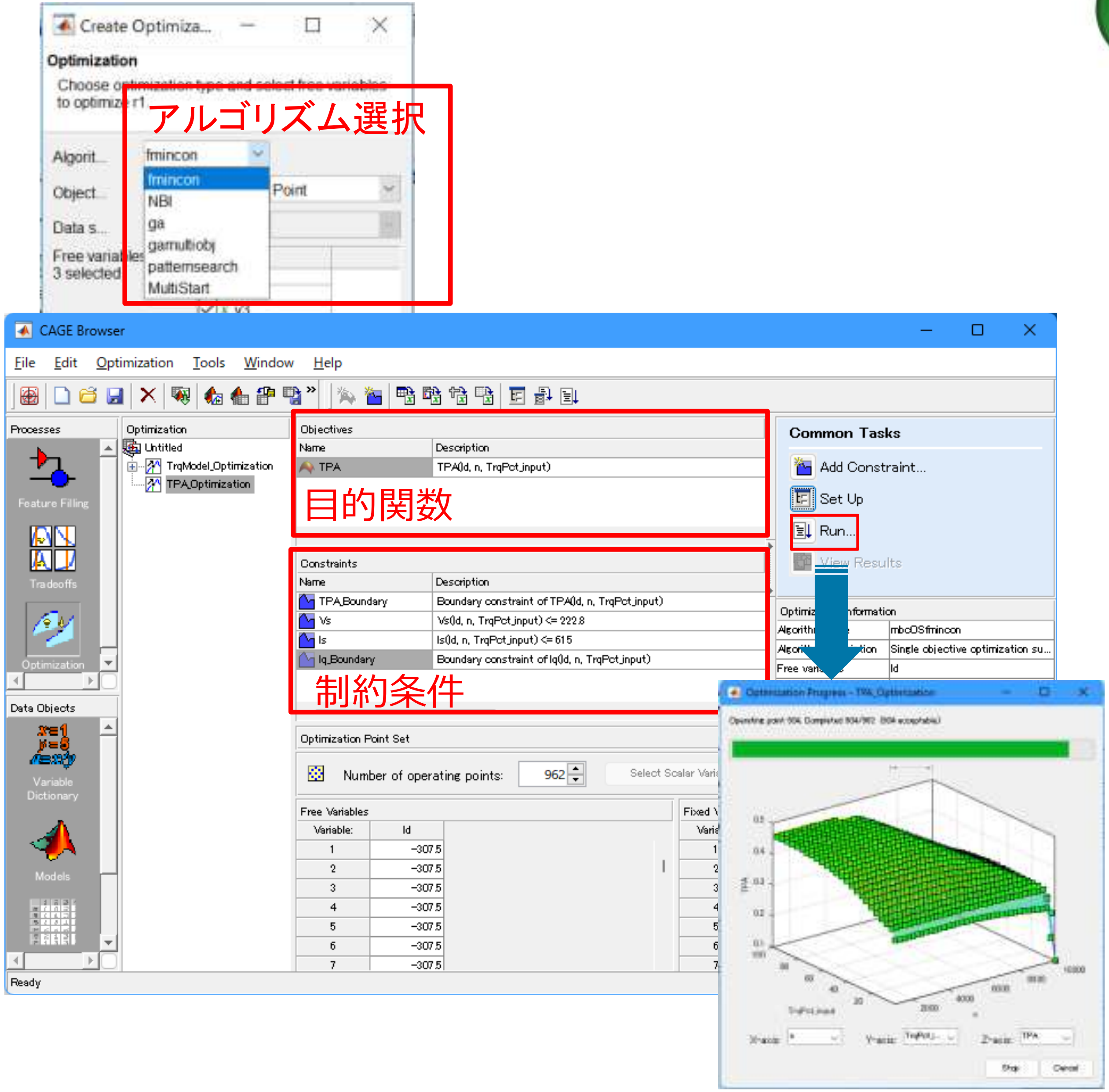
<制約条件>

$$I_s(I_d, I_q) <= I_s\ max$$
$$V_s\ (I_d, I_q, n, trq) <= V_s\ max$$

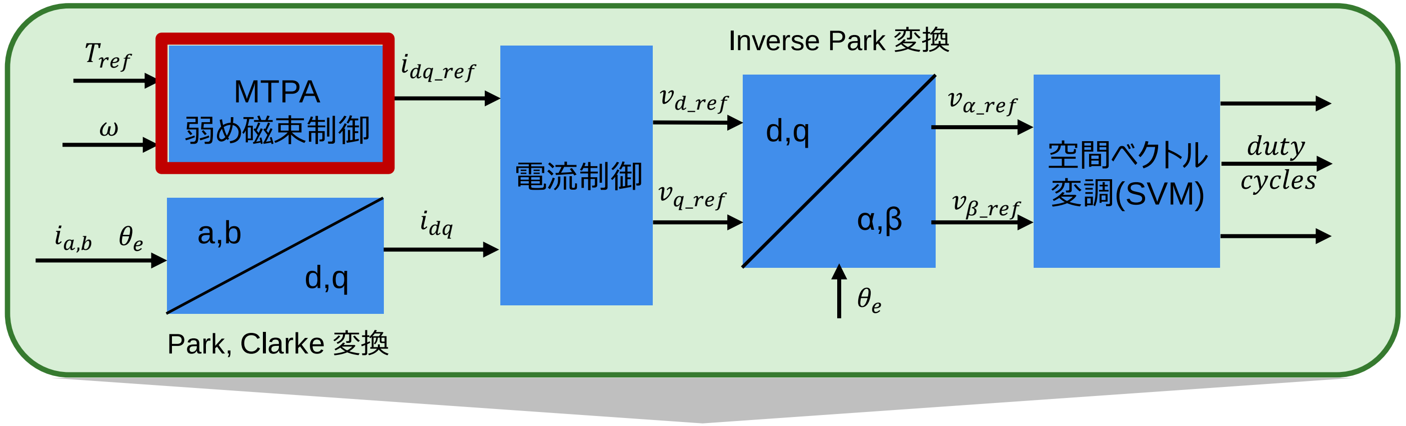


キャリブレーション

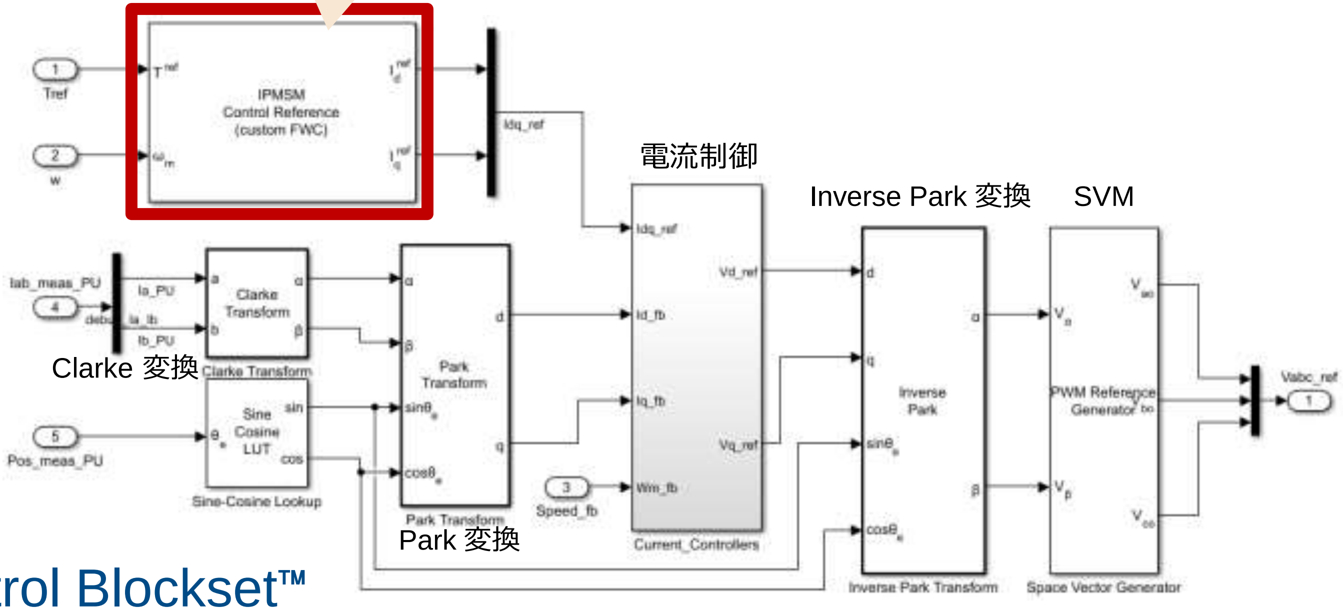

MBC Model Fitting
Create experimental designs and statistical models for model-based calibration.
Your project is empty. Design an experiment or import data for modeling.
Design Experiment
Import Data
Fit Models
Generate Calibration
Browse Project

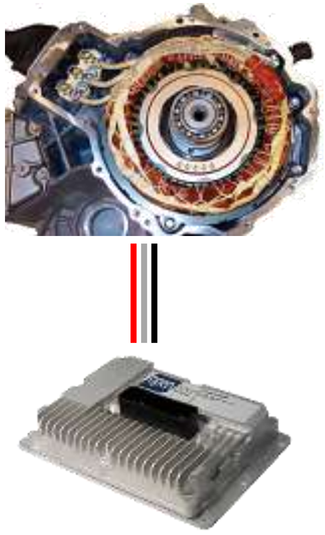

アルゴリズム選択
目的関数
制約条件
Create Optimiza...
Optimization
fmincon
NBI
ga
gamultiobj
patternsearch
MultiStart
CAGE Browser
Common Tasks
Add Constraint...
Set Up
Run...
View Results
Objectives
TPA
Constraints
TPA_Boundary
Vs
Is
Iq_Boundary
Number of operating points: 962

実装



$Id(Tref,w_{rpm}),Iq(Tref,w_{rpm})$
テーブル設定

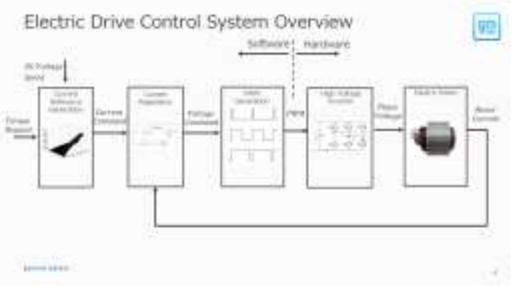




Motor Control Blockset™

Embedded Coder®

User Story



Electric Machine Calibration Using Model-Based Calibration

Daniel Berry, General Motors

More Info

[MathWorks technical article]

MathWorks® Products Solutions Academia Support Community Events

Technical Articles and Newsletters

Search Technical Articles

Overview | Search Technical Articles | Newsletters | Cleve's Corner Collection | Sign Up

Calibrating Optimal PMSM Torque Control with Field-Weakening Using Model-Based Calibration

By Dakai Hu, MathWorks

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) calibration is an indispensable step in the design of high-performance electric traction drive controls. Traditionally, the calibration process involves extensive hardware dynamometer (dyno) testing and data processing, and its accuracy depends largely on the expertise of the calibration engineer.

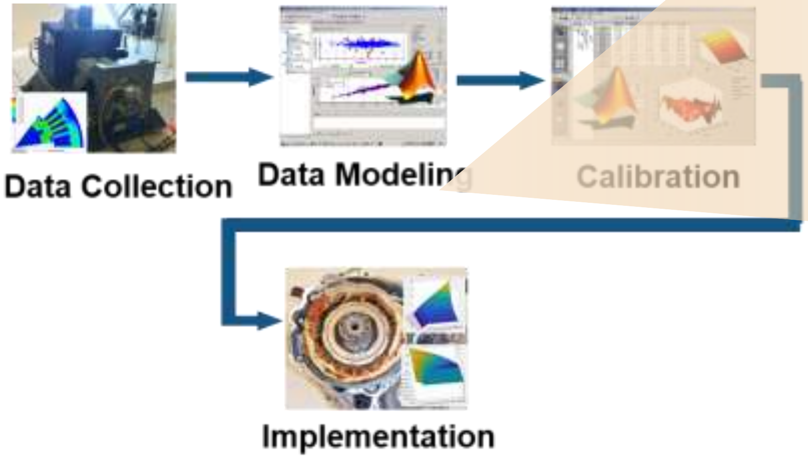
Model-based calibration standardizes the PMSM calibration process, reduces unnecessary testing, and generates consistent results. It is an industry-proven, automated workflow that uses statistical modeling and numeric optimization to optimally calibrate complex nonlinear systems. It can be used in a wide range of applications and is well known for being adopted in internal combustion engine control calibration. When applied to e-motor control calibration, the model-based calibration workflow can help motor control engineers achieve optimal torque and field-weakening control for PMSMs.

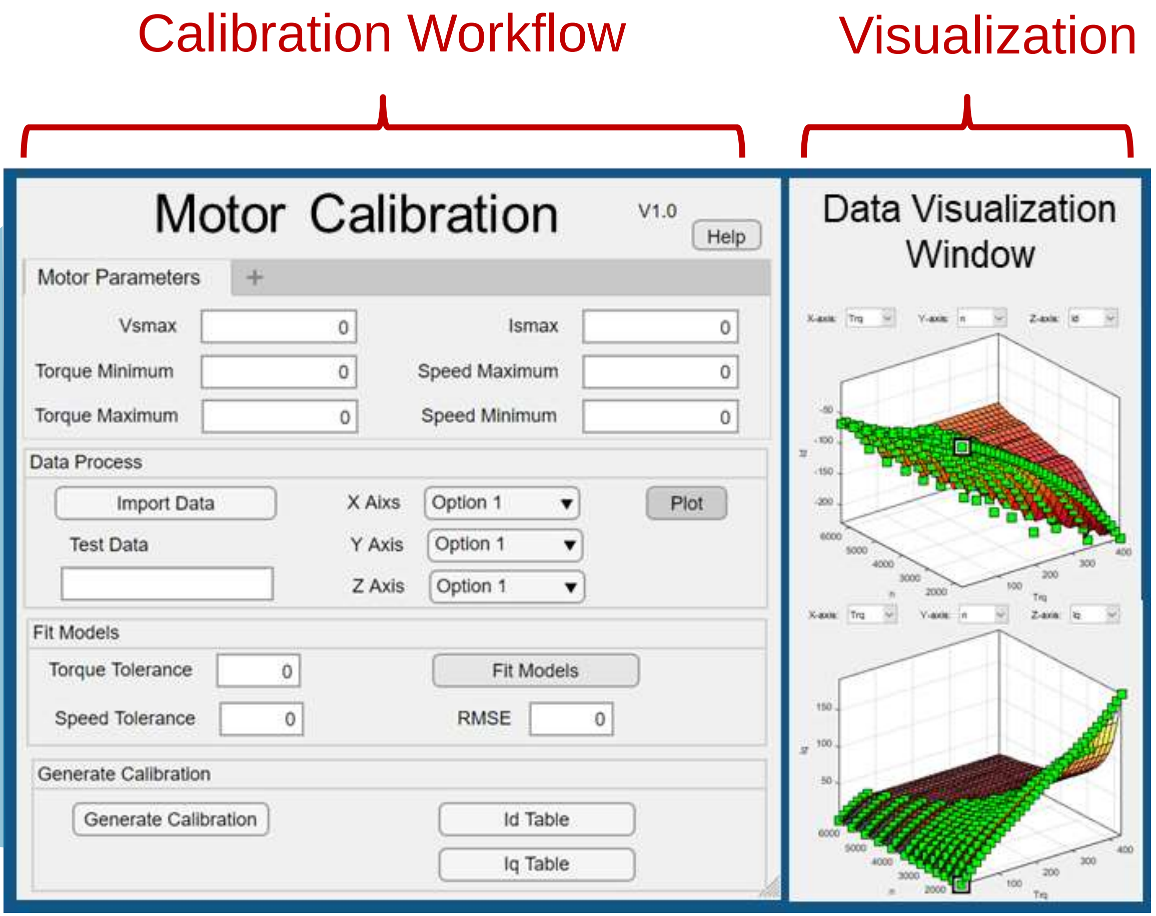
PMSM Characterization and Calibration: Challenges and Requirements

PMSMs stand out from other types of e-motors because of their high efficiency and torque density. This is because the permanent magnets inside the machine can generate substantial air gap magnetic flux without external excitation. This special trait makes a PMSM an excellent candidate for both non-traction and traction motor drive applications.

コンサルティング サービス

- サービス内容
  - MBCワークフローに関するアドバイス
  - ツールの基本操作をレクチャ
  - データの前処理支援
  - GUIでMBCワークフローを構築



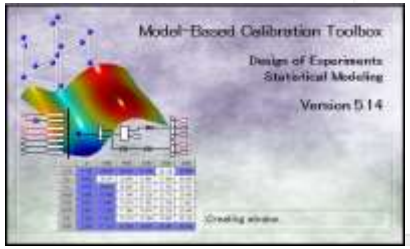


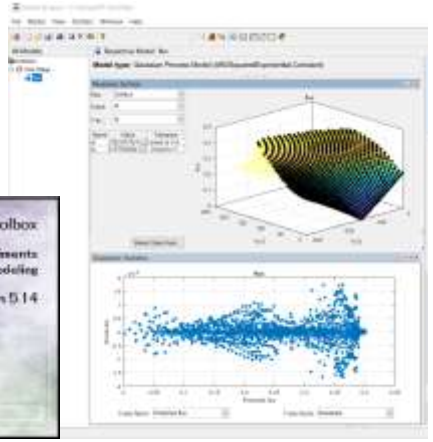
まとめ

- **本セッションの説明内容の振り返り**
  - ✓ Model-Based Calibration Toolboxを活用したIPMSMの弱め磁束制御テーブルのキャリブレーション方法を紹介

- **MATLAB製品の強み**
  - ✓ 一気通貫で設計意図を伝搬する製品群＆効率的に作業が行える環境を提供
  - ✓ 豊富な例題を備えたドキュメントやテクニカルサポート・トレーニング・コンサルを提供

モーターをキャリブレーションする際は、MATLAB製品を是非ご活用下さい。





Accelerating the pace of engineering and science