

# ACサーボモータを用いた放電加工機の 高精度制御に関するMATLAB適用事例

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所  
メカトロニクス技術部門 技術顧問  
今城 昭彦

- (一社)日本機械学会 理事、自動運転に関する分野横断型研究会幹事、  
診断・メンテナンス技術に関する研究会委員、1Dモデリング研究会員
- (一社)システム制御情報学会 代表会員
- (一社)日本航空宇宙学会 正員

# イントロダクション

# 会社紹介 (三菱電機 先端技術総合研究所)

三菱電機グループの幅広い事業分野のコア技術・最先端技術の研究開発を行っています。  
 パワーエレクトロニクス、電気、機械、メカトロニクス、環境、材料、エネルギー、デバイス、システムソリューション、  
 映像・表示などの分野において、新たな時代を切り拓くキー・テクノロジーを提供しています。



- 重電システム (電力、交通、昇降機、ビル管理などの社会インフラ技術)
- 産業メカトロニクス (FAシステム、自動車用電装製品などの産業向けテクノロジー)
- 情報通信システム (宇宙開発から携帯電話まで、幅広い分野における情報通信技術)
- 電子デバイス (パワーデバイスや高周波デバイスなどの半導体や液晶関連技術)
- 家電機器 (もっと快適な暮らしを提案する、さまざまな家庭電気技術)
- 共通基盤技術 (安心、安全、省エネなどこれからの社会基盤を支える技術)



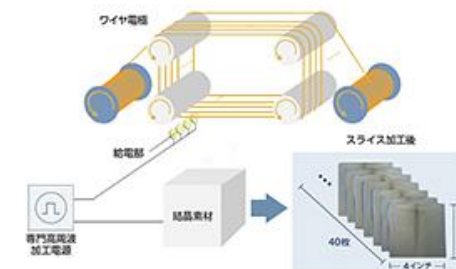
産業用ロボット<AI力覚制御>



次世代超大型望遠鏡TMT  
「分割鏡交換ロボット技術」



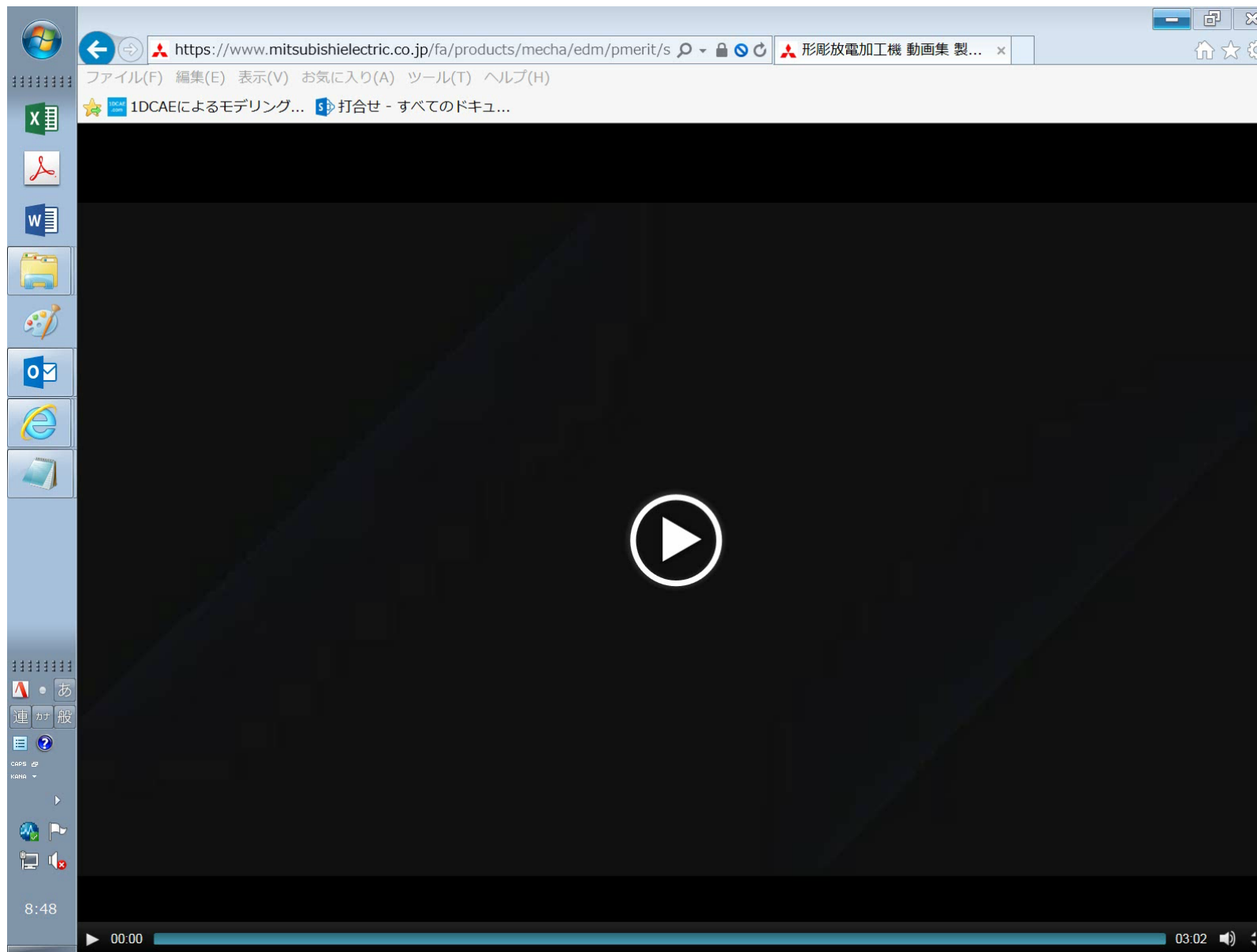
プリント基板用レーザ加工機



マルチワイヤ放電スライス

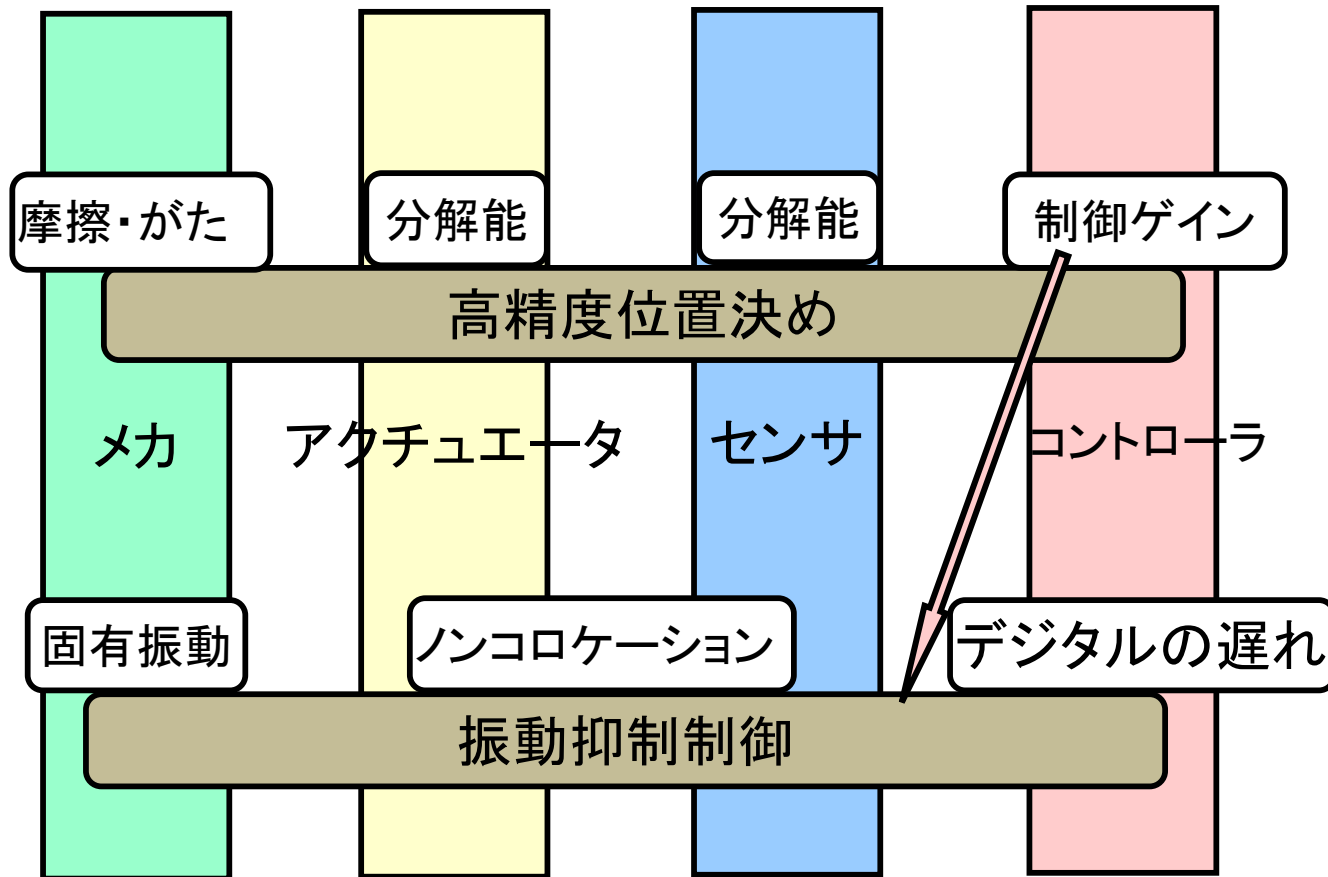
三菱電機株式会社

# 三菱電機形彫放電加工機SV-P Series



# 研究開発の課題

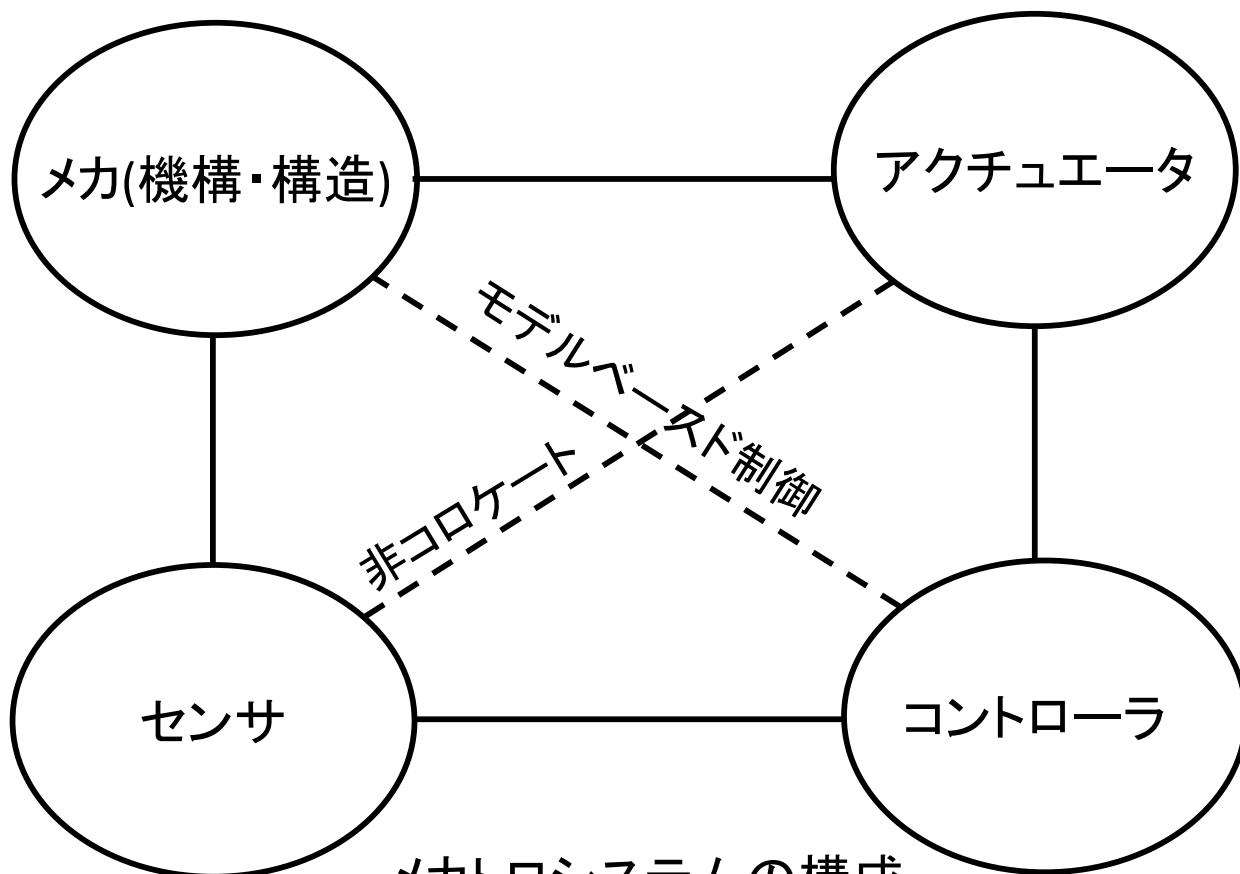
## メカトロシステムの課題と関連事項



- 放電加工機の要求仕様を満たすように、制御、電気、メカを含めたシステム全体の機能・性能を検討したい。
- 高速・高性能な位置決めが悪影響を及ぼすメカの振動・摩擦・がたや、アクチュエータやセンサの分解能や遅延を考慮して様々な制御方法を検討したい。
- 研究開発の効率化のために、開発上流の机上検証の段階でシステムの仕様、制御方法などを作り込み、実機検証の回数を減らしたい。

# 課題解決のためにMATLAB製品を利用した理由

メカトロシステムと開発アプローチ



メカトロシステムの構成

EDM: Electrical Discharge Machine(放電加工機)

三菱電機株式会社

## モデリングの勘所

一般論をいかに製品固有の条件へ展開するか。製品の特徴: 個別本質論

⇒差別化、競争力

高速・高精度位置決め機構

・ワイヤ⇒シール抵抗

・彫彫⇒ノンコロケーション必須

## 共通プラットフォーム

ACサーボ、ボールねじ

デジタルの遅れ

多自由度系のモデリング

⇒ラグランジアン

マルチボディダイナミクス

FEM構造振動解析

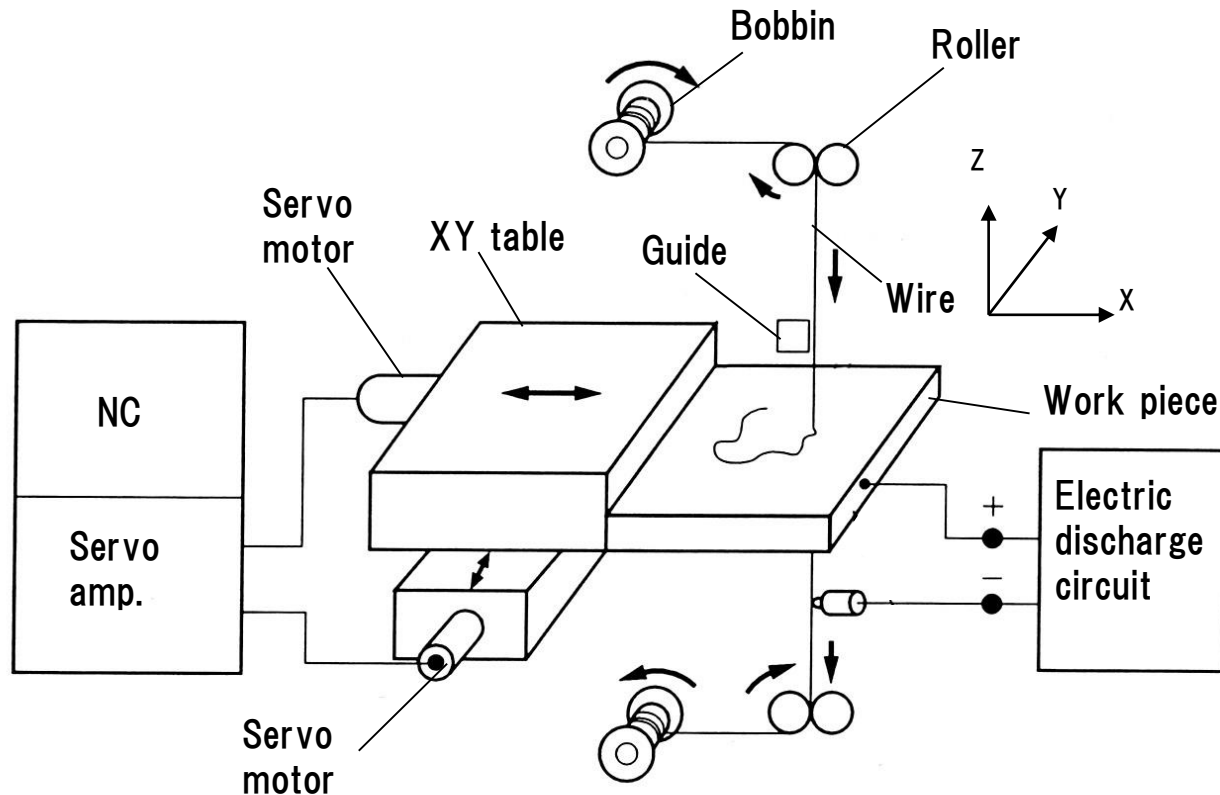
**制御系解析(MATLAB)**

# MATLAB適用事例

# 放電加工機のシステム概要、設計目的

## システム概要

- ・ ACサーボモータを使ってXYステージを高速・高精度に位置決め制御する。



## 設計目的

- ・ 指令位置に対して、正確に応答すること。位置指令には、(1)電極とワークの電圧フィードバックの内側位置ループの指令値、(2)CNC自動運転の位置指令、(3)手動送り指令があるが、いずれに対しても同一の制御則でオーバシュートなく、短い立ち上がり時間で応答すること。定量的には、適切な制御パラメータが機種毎にノウハウとして蓄積されており、そのパラメータで安定に動作させることが第一ステップ。そのパラメータで目標仕様を満たさないときには、実機試験で性能を満たす微調整を実施。機械系を調整する場合もある。



標準的な機械系・制御系で仕様を満たさないとき、アドバンスな手法を検討

## ① プラントモデル

- 仕様を満たすためにハードルとなっているクリティカルな物理現象を表現するモデルの作成
- 重要なエレメントについては、機械系、電気系、制御系を漏れなくトータルに記述
- 代表例として、振動、摩擦、ロストモーション、制御系時間遅れ、センサ・アクチュエータの分解能

## ② 制御設計

- クリティカルな物理現象を押さえ込む制御方式の導入
- 代表例として、振動抑制制御、摩擦補償制御

## ③ 実機検証

- 理論検討、シミュレーションで導いた方式を実機検証し、不一致点に関してモデル見直し
- 各種制御パラメータの最終微調整

# プラントモデル

# 機械系モデルの考え方(その1:振動)

形彫放電加工機の機械系を4自由度でモデル化

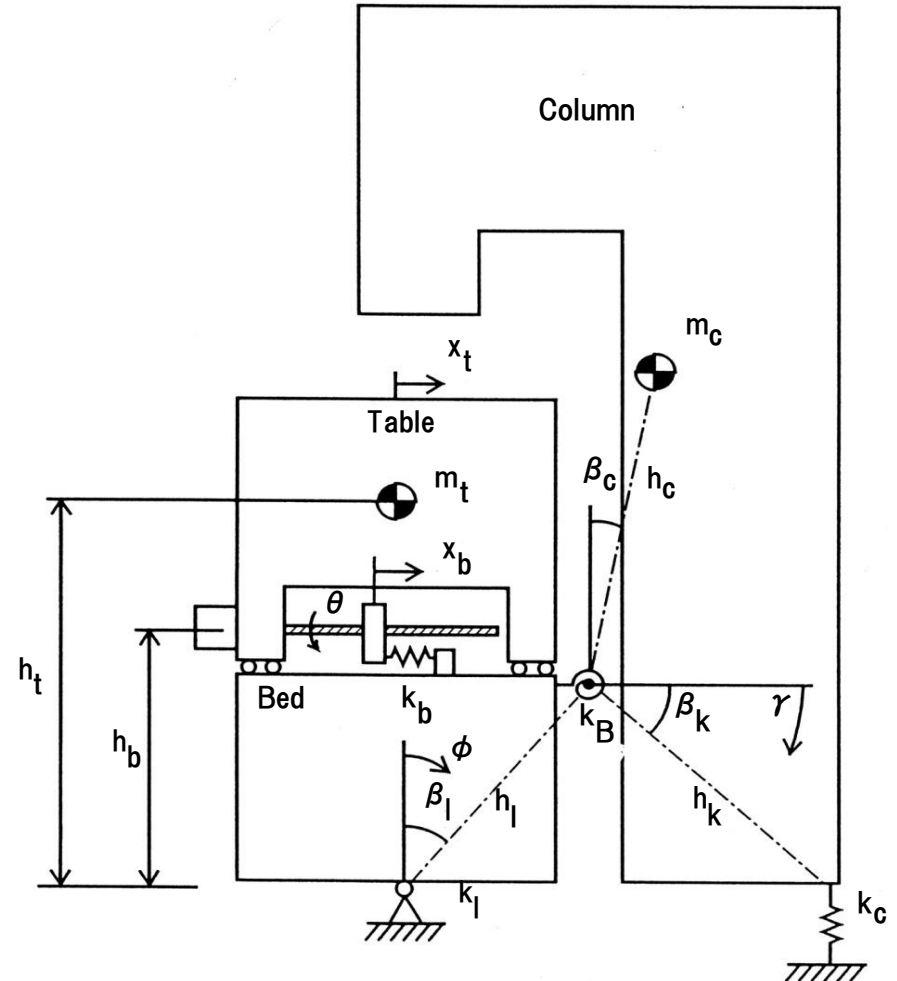
【クリティカルな物理現象】:コラムに取り付けられた電極とテーブル上の被加工物の相対距離に比例して放電電圧が生じる。この放電電圧はACサーボシステムと非コロケイトの関係にあり、放電電圧フィードバックループが不安定になり易い。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = 0$$

$$\mathbf{X} = \{\theta, x_t, \phi, \gamma\}^T$$

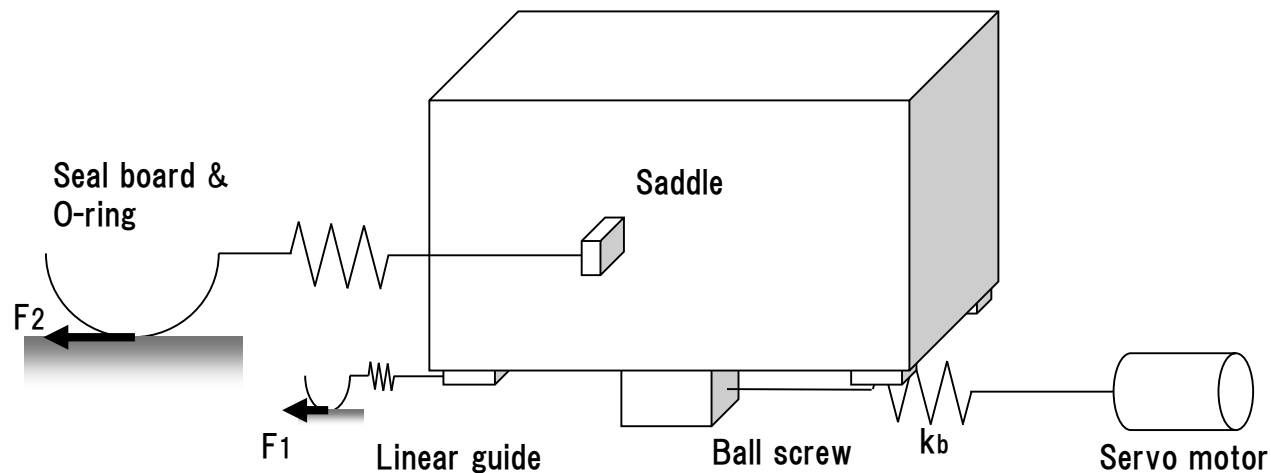
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} J & m_t \eta & 0 & 0 \\ m_t \eta & m_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_b + m_t h_t^2 & m_c h_t h_c \cos(\beta_l - \beta_c) \\ 0 & 0 & m_c h_t h_c \cos(\beta_l - \beta_c) & I_c + m_c h_c^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_b & h_b k_b & 0 \\ 0 & h_b k_b & -h_b^2 k_b - k_B & k_B - h_l h_k k_c \cos \beta_k \sin \beta_l \\ 0 & 0 & -h_l^2 k_c \sin^2 \beta_l & -k_B - h_k^2 k_c \cos \beta_k \end{bmatrix}$$

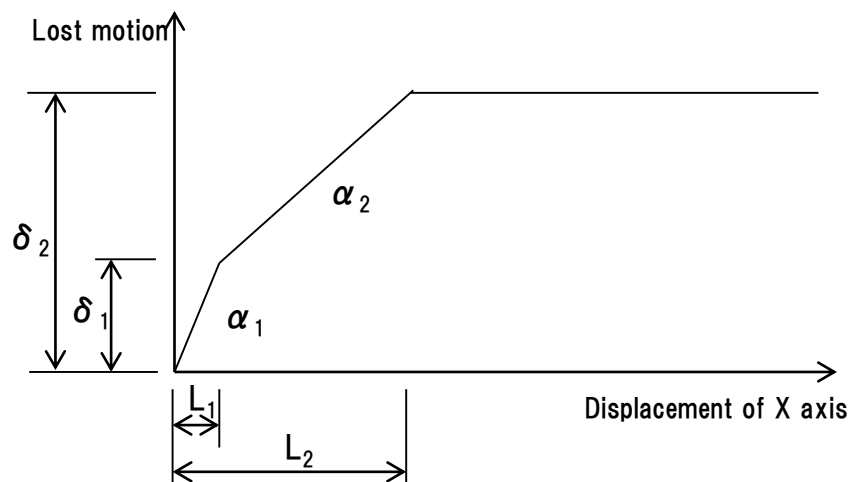


三菱電機株式会社

# 機械系モデルの考え方(その2:ロストモーション)



駆動系の力学モデル



ロストモーション補正モデル  
三菱電機株式会社

[特許第3902256号「位置決め装置」](#)

# 電気系モデルの考え方

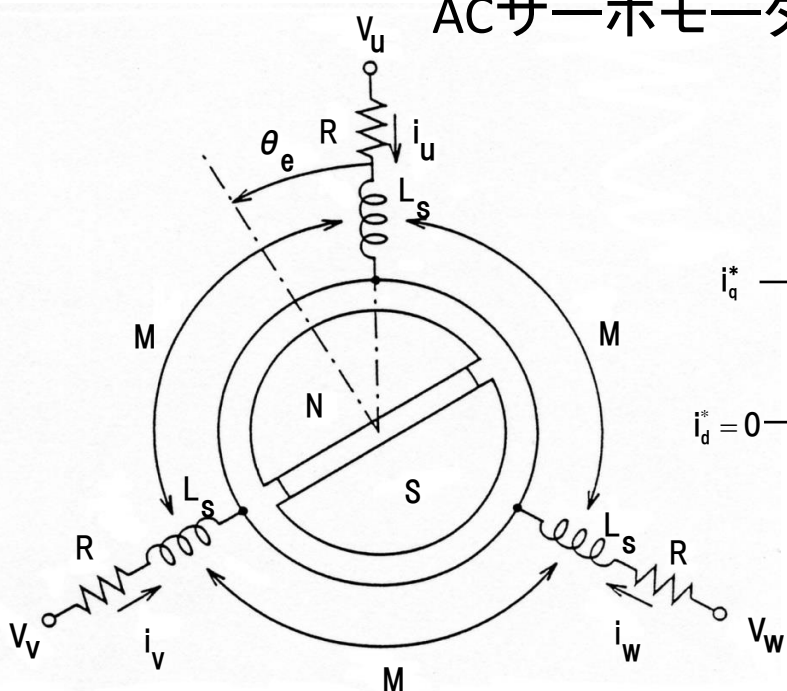
整流ブラシが不要の永久磁石同期モータがサーボモータの主流

整流は角度検出器とインバータで電気的に行う

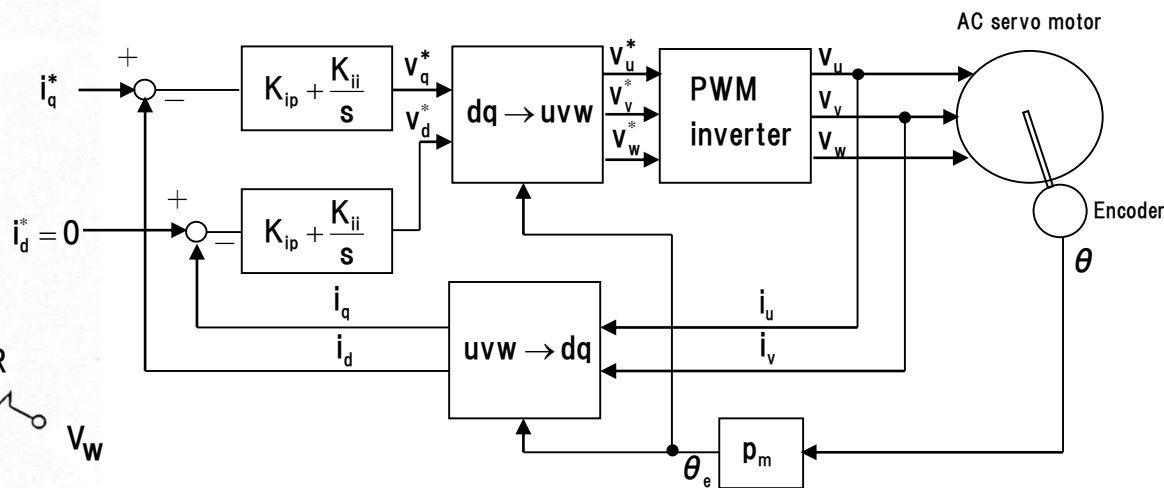
ブラシの機械的な接触がなく  
長寿命で特性劣化がない

角度検出器は整流にも使うが精密位置決め用のセンサとなる

ACサーボモータ: 光学式エンコーダ22bit標準

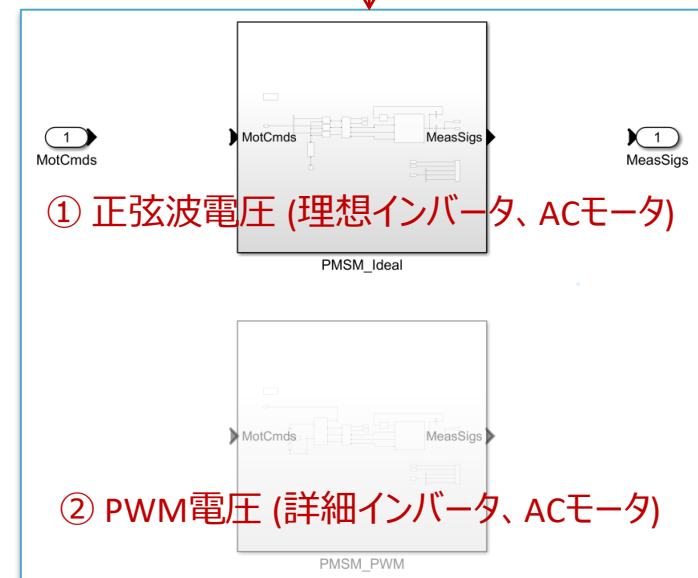
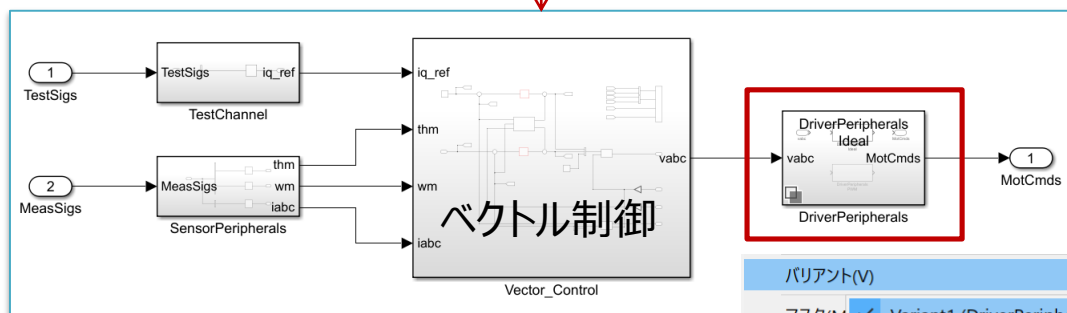
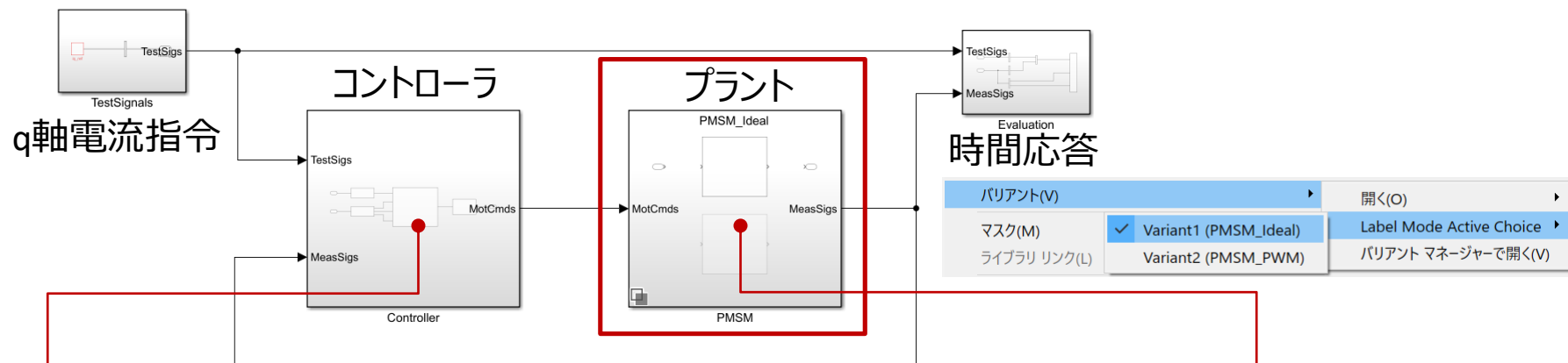


三相永久磁石同期モータの等価回路

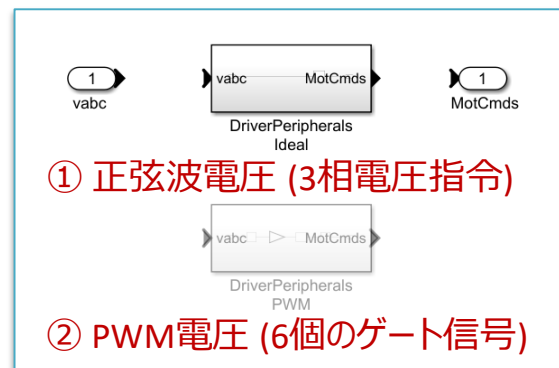


電流制御系のブロック線図

# MATLABモデル



インバータ + モータ



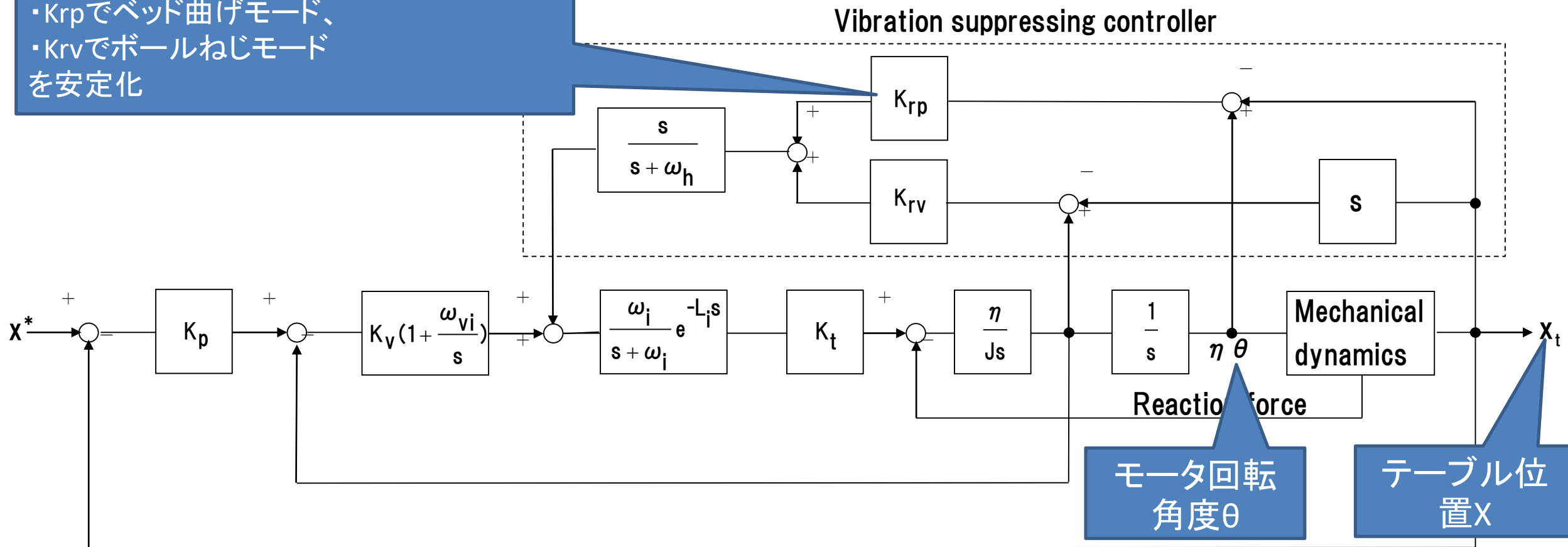
# 制御設計

# 高速・高精度の位置決め制御設計の考え方①

モータとテーブルの相対位置・相対速度をフィードバックして、非コロケイト系を安定化

MATLABプログラムで根軌跡を描いて設定

- ・Krpでベッド曲げモード、
- ・Krvでボールねじモードを安定化

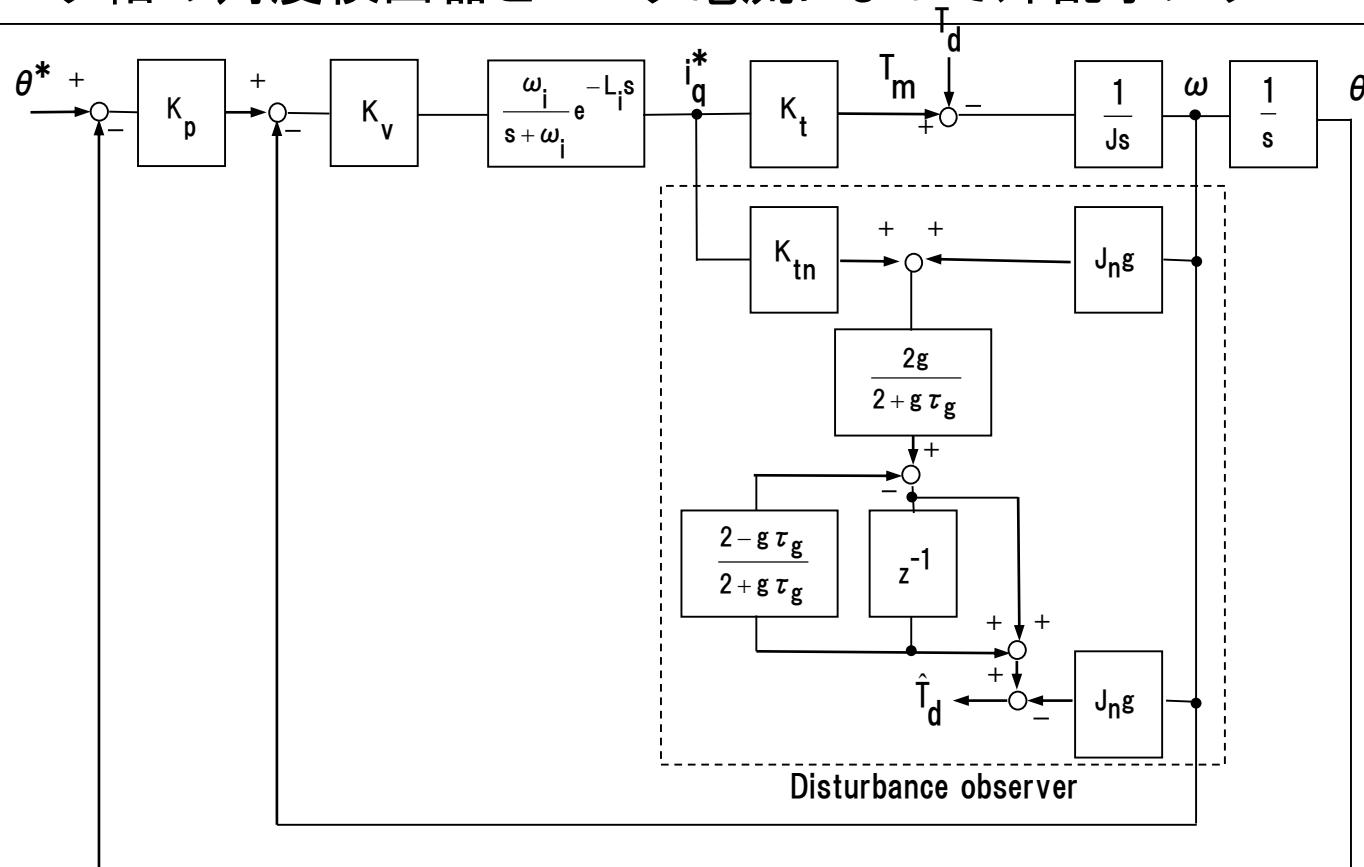


三菱電機株式会社



# 高速・高精度の位置決め制御設計の考え方②

モータ軸の角度検出器とモータ電流によって外乱オブザーバを構成

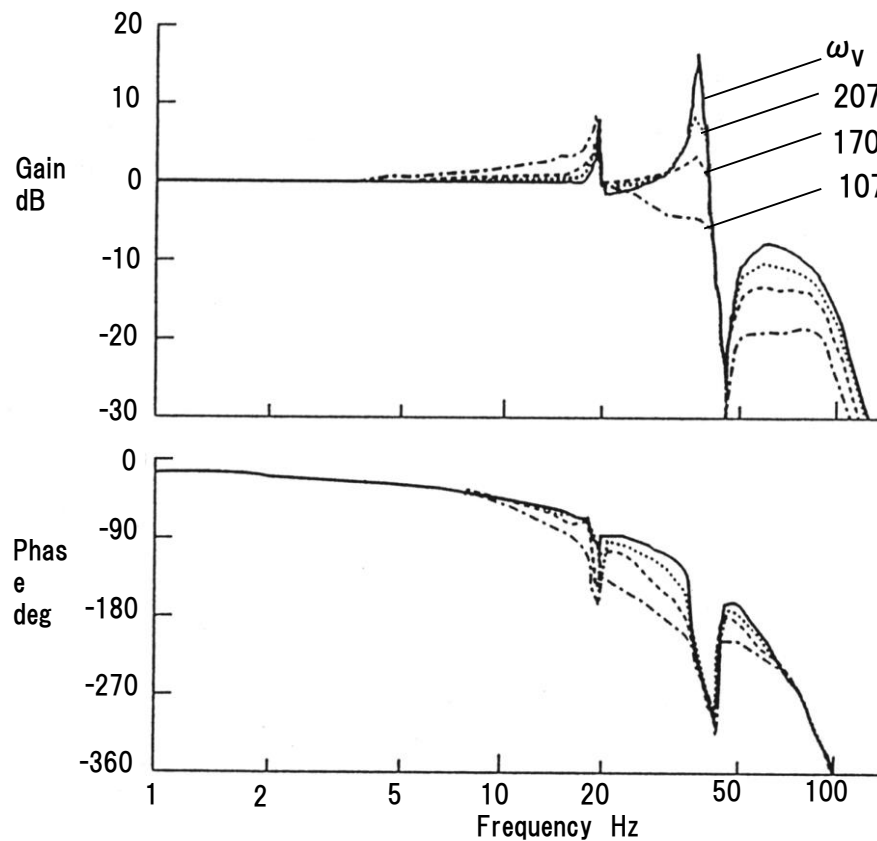


外乱オブザーバを含めた位置制御系のブロック線図

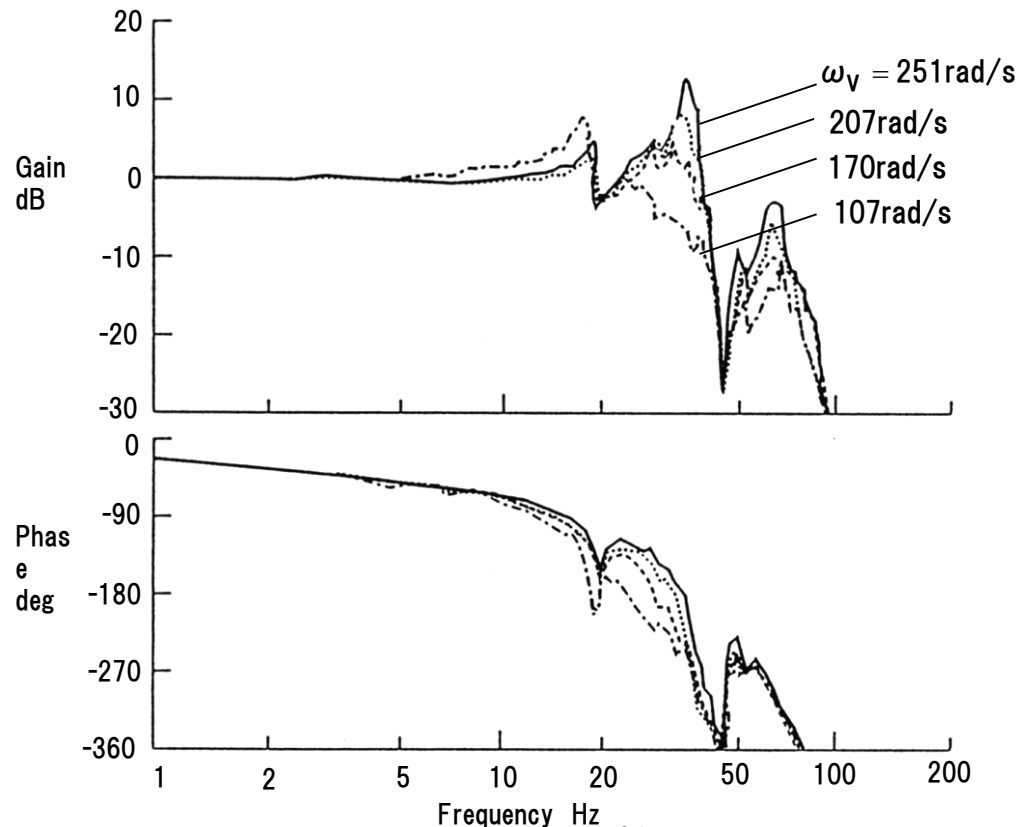
三菱電機株式会社

# 実機検証

# 非コロケイト系の不安定化状況



シミュレーション


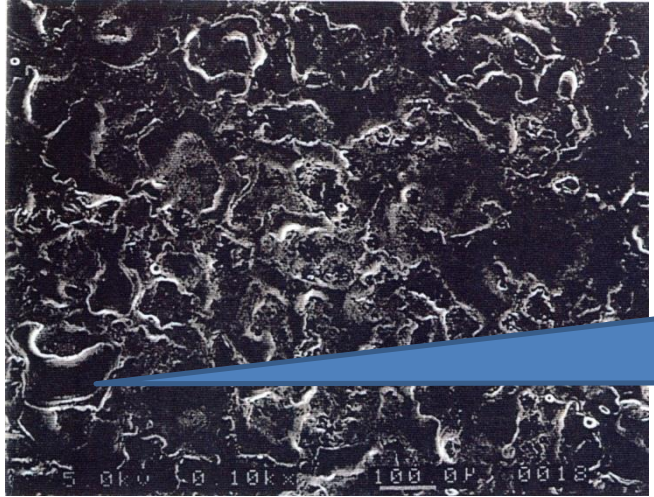
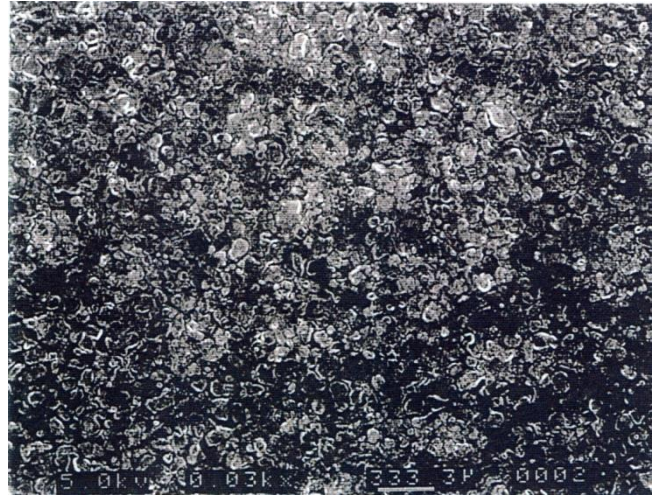
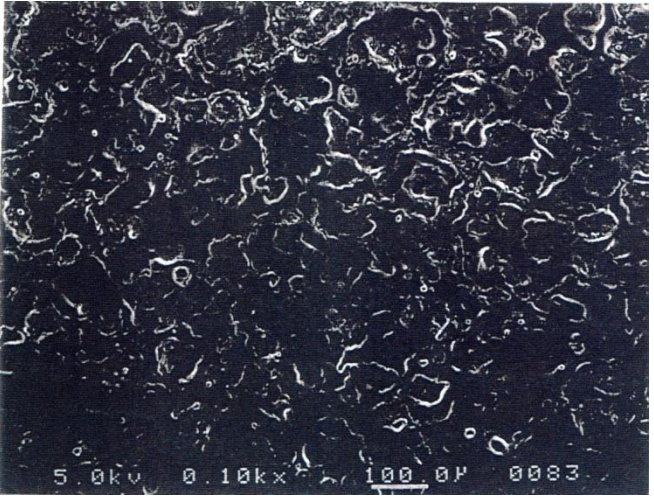


実験

## 位置制御系の閉ループ周波数伝達特性

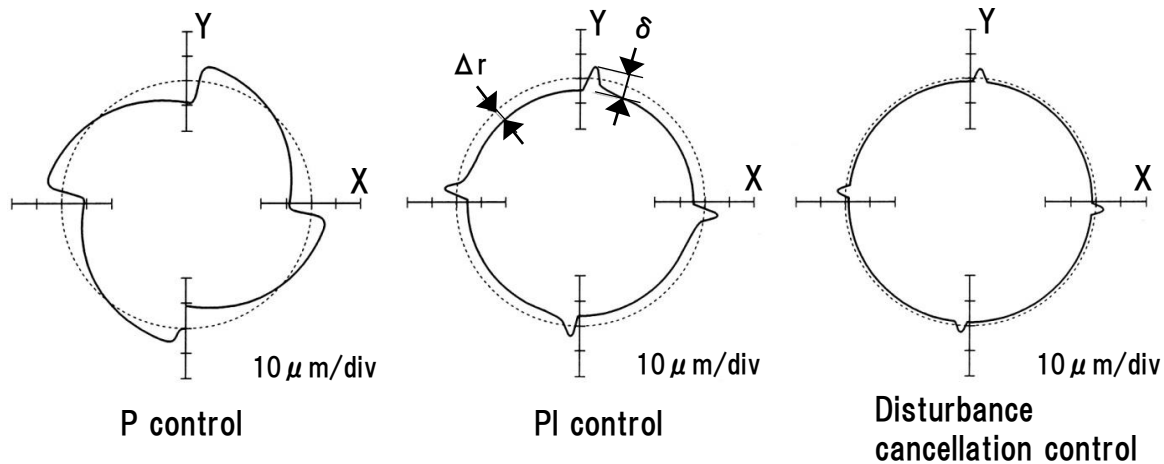
三菱電機株式会社

# 振動抑制制御による加工安定化の確認

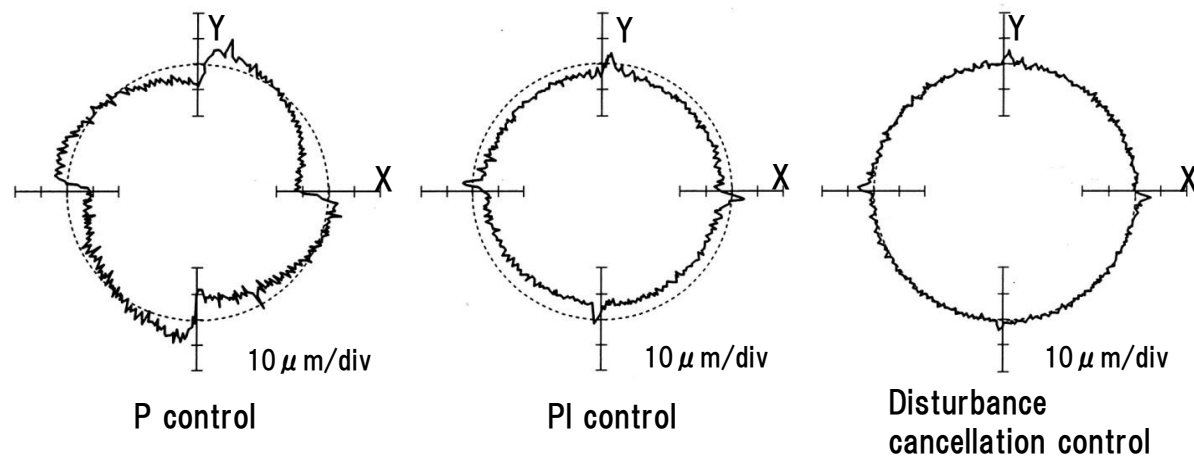
	倍率30倍	倍率100倍
振動抑制制御あり		
振動抑制制御なし		

放電痕が大きくなっており、放電状態の安定化を確認

# 外乱相殺制御による摩擦ロストモーションを低減



シミュレーション



実験

円弧軌跡の比較

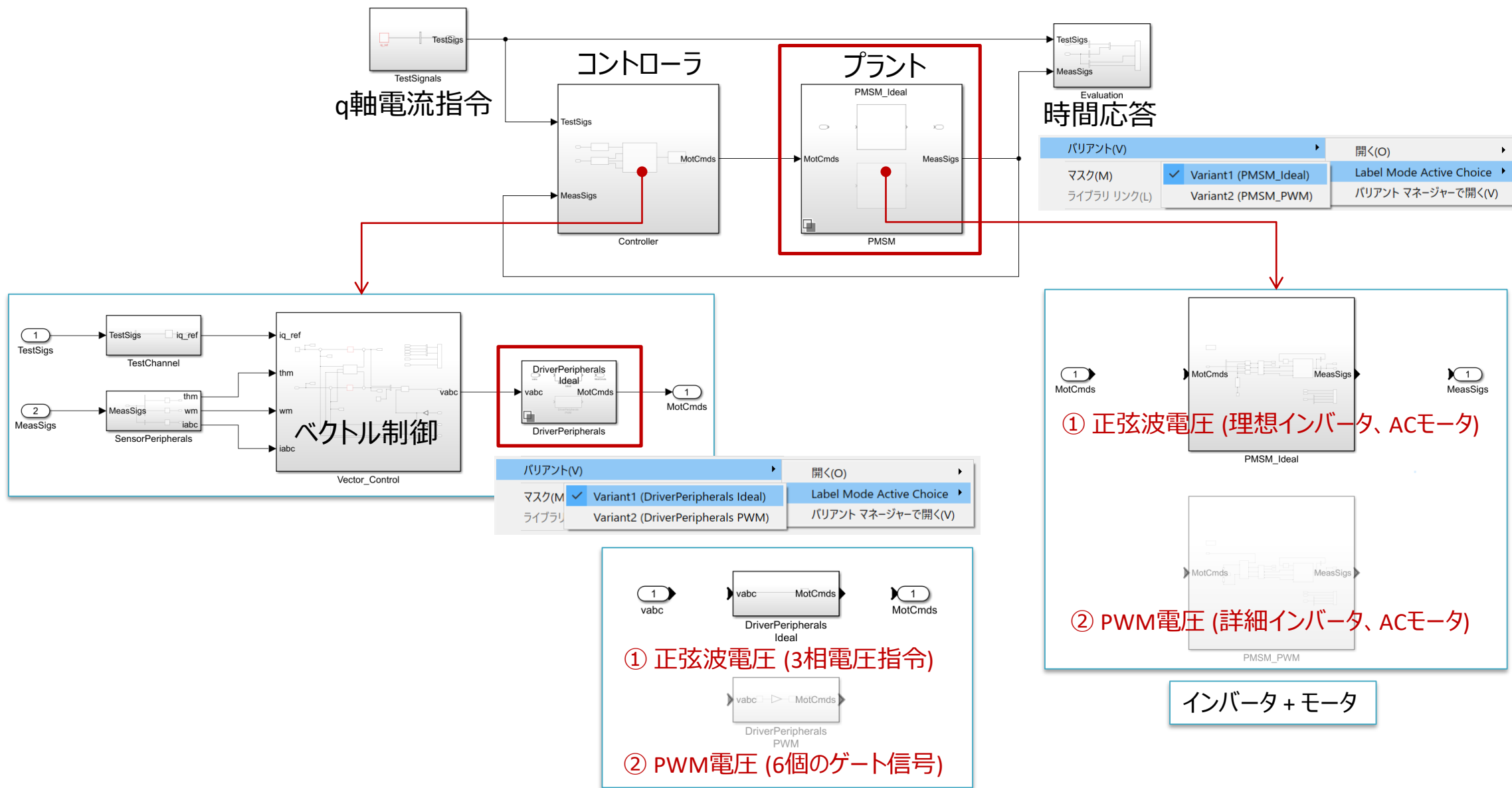
三菱電機株式会社

# まとめ

- 高速・高性能の位置決め制御システムの設計で、MATLABを使って良かったこと。
  1. 加工機を4自由度でモデル化し、見通しよく振動抑制制御系を設計。
  2. 機械系・電気系をトータルに捉えて外乱を推定し、センサ追加なしにオブザーバで高精度化を実現。
- サーボモータ、コントローラ、機械構造をトータルに最適化して製品価値(位置決め精度)を向上

# 付録

# モデル: ACサーボモータのベクトル制御

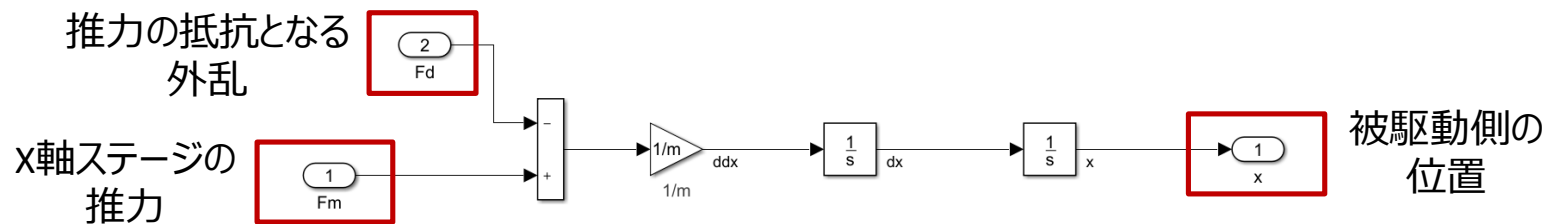




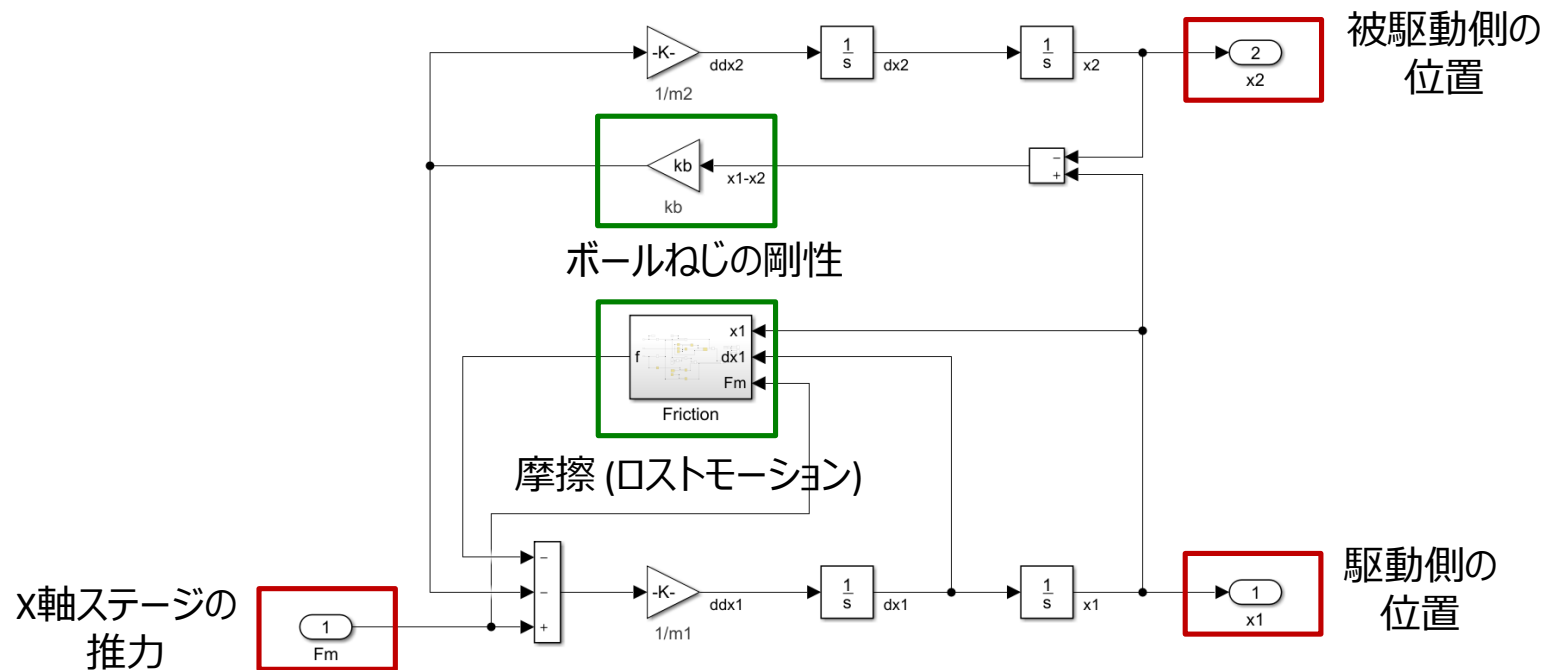
# 放電加工機の機械系モデル

位置決め制御系の基本特性を理解するとき、1自由度系や2自由度系モデルを利用する。

**1自由度系モデル** (駆動側と被駆動側を1つの剛体とみなして、並進方向のシンプルな動きのみを模擬する。)



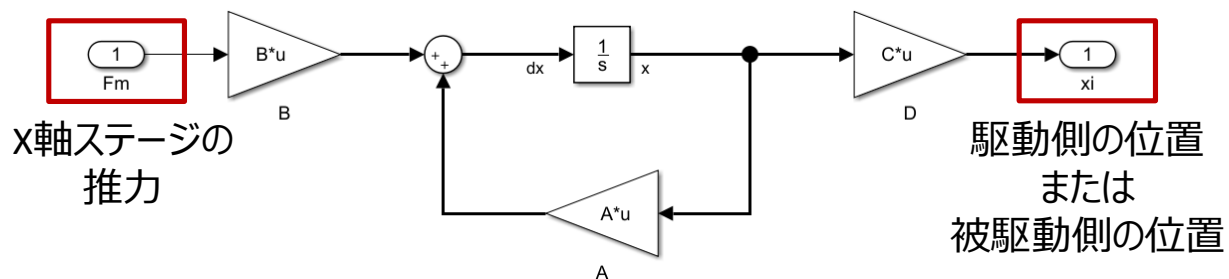
**2自由度系モデル** (駆動側と被駆動側を別の剛体に分けて考えて、並進方向の振動のみを模擬する。)



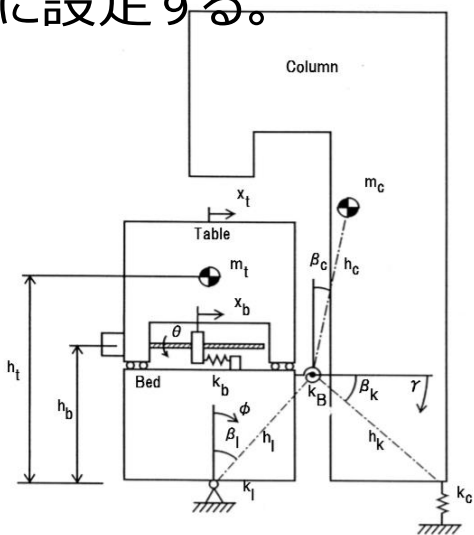
# 放電加工機の機械系モデル (続き)

位置決め制御系の制御効果を詳細に確認するとき、高次の4自由度系モデルを利用する。

4自由度系モデル (モータの回転とテーブルの並進に加えて、ベッドとコラムが揺動する回転まで模擬する。)



以下の4自由度系の運動方程式から、状態空間モデルのA、B、C、D行列を求めて、上式に設定する。



4自由度系の運動方程式

$$M\ddot{X} + KX = F$$

$$X = \{\theta, x, \phi, \gamma\}^T$$

$$M = \begin{bmatrix} J & m_t \eta & 0 & 0 \\ m_t \eta & m_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_b + m_t h_t^2 & m_c h_t h_c \cos(\beta_1 - \beta_c) \\ 0 & 0 & m_c h_t h_c \cos(\beta_1 - \beta_c) & I_c + m_c h_c^2 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_b & h_b k_b & 0 \\ 0 & h_b k_b & -h_b^2 k_b - k_B & k_B - h_t h_k k_c \cos \beta_k \sin \beta_1 \\ 0 & 0 & -h_t^2 k_c \sin^2 \beta_1 & -k_B - h_k^2 k_c \cos \beta_k \end{bmatrix}$$

状態空間モデル

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

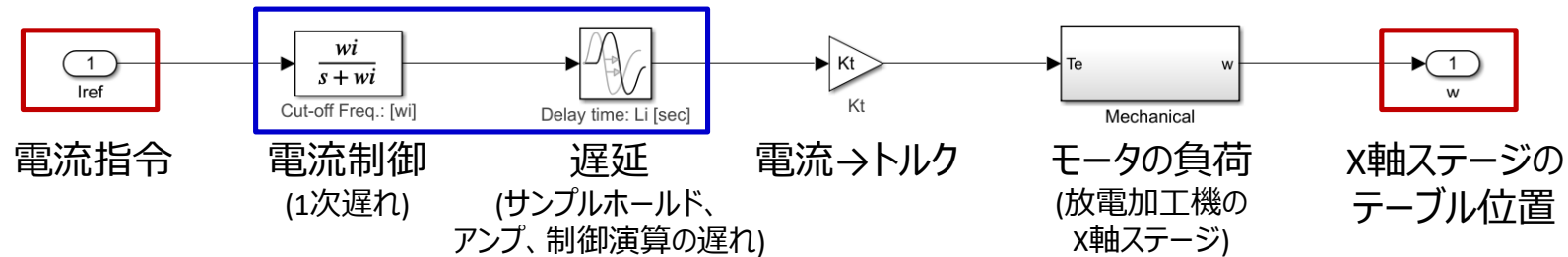
$$y = Cx + Du$$

使用ツール  
Simulink

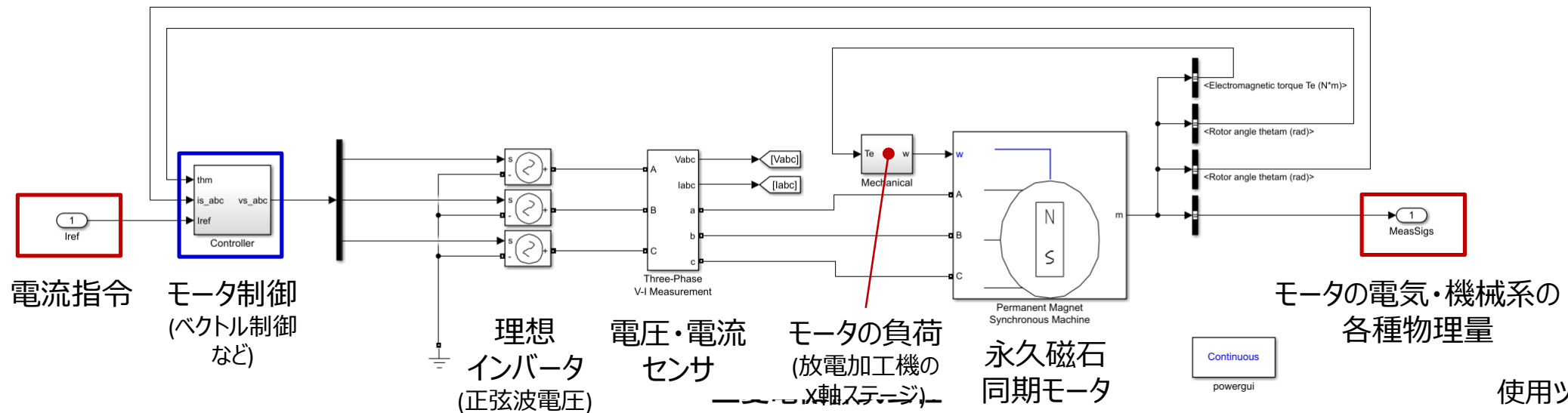
# 放電加工機の電気系モデル

位置決め制御系の基本特性を理解するとき、簡易電気モデルやACモータモデル利用する。

簡易電気モデル (モータの電流制御は実現できるものとみなして、簡単な伝達関数と遅れ要素で模擬する。)



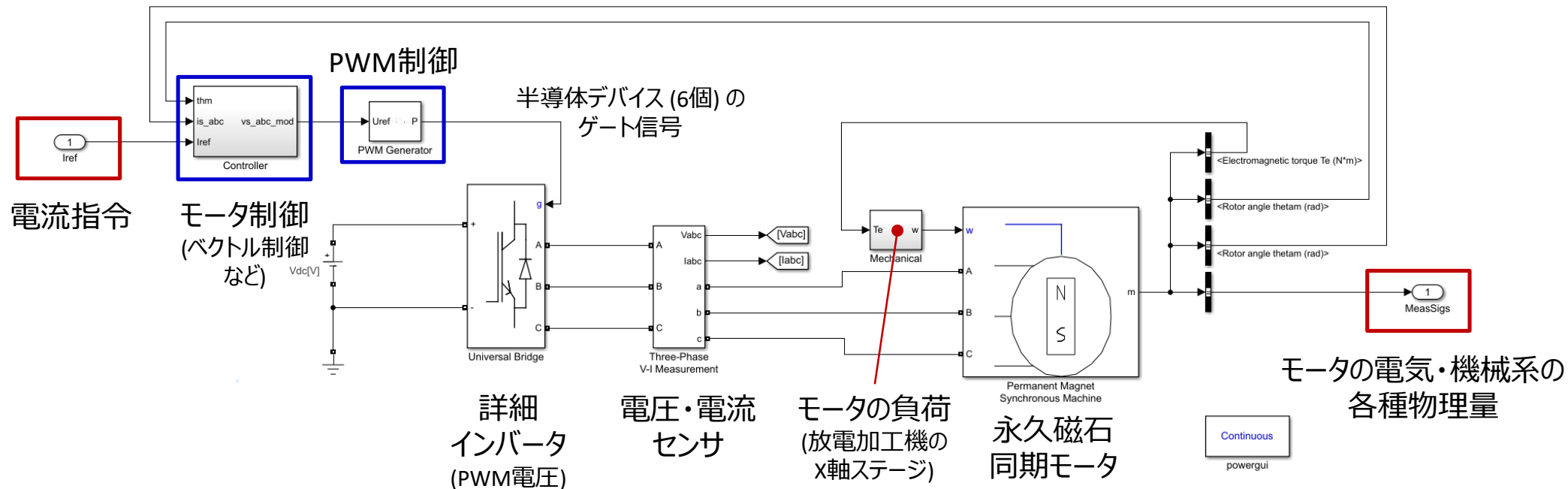
ACモータモデル (モータの種類や容量に応じた制御を設計するときは、ACモータの動特性を模擬する。)



# 放電加工機の電気系モデル (続き)

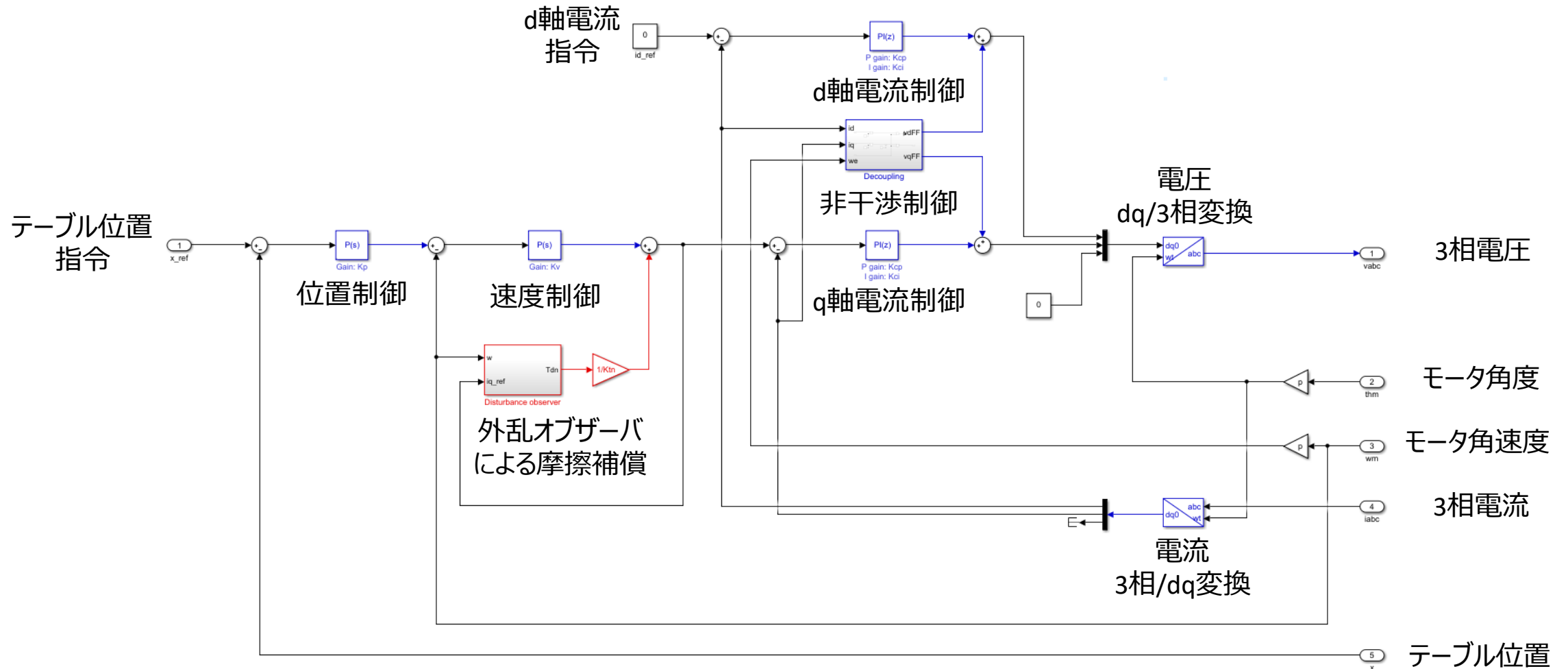
位置決め制御系の制御効果を詳細に確認するとき、ACモータの駆動回路モデルを利用する。

ACモータの駆動回路モデル (電気回路の影響を検討するときは、半導体デバイスのPWM制御を模擬する。)



# 放電加工機の制御系モデル

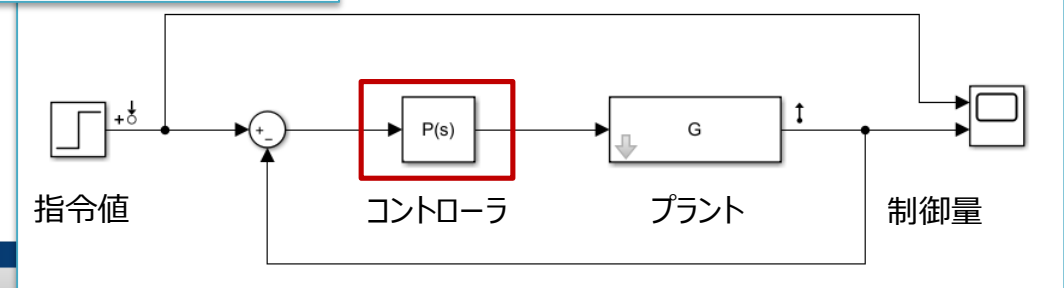
位置決め制御系の高精度化のため、ベクトル制御と外乱オブザーバによる摩擦補償を利用する。



# 制御系モデル (続き)

補償器のゲインを決める際に根軌跡を利用する。

例: シンプルな閉ループ系

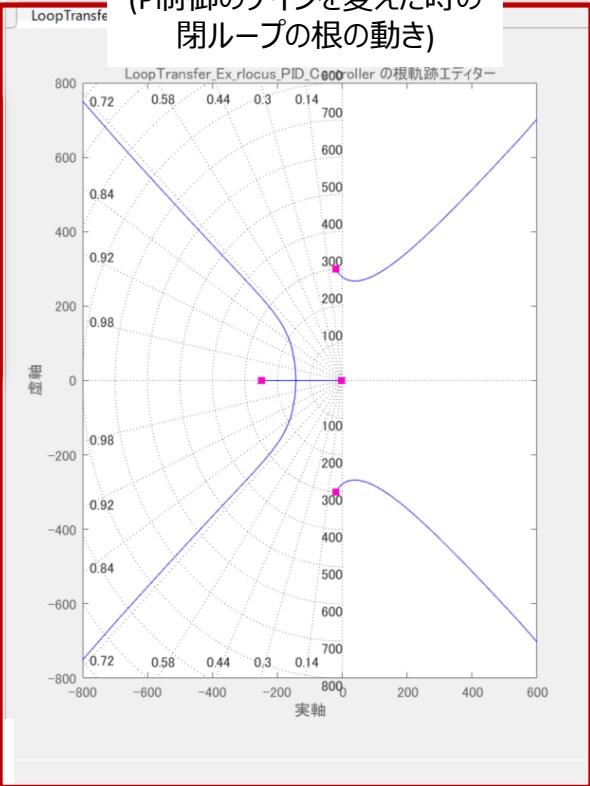


P制御の  
ゲイン

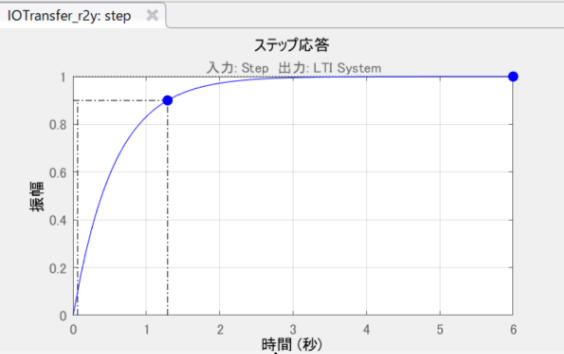


## 根軌跡

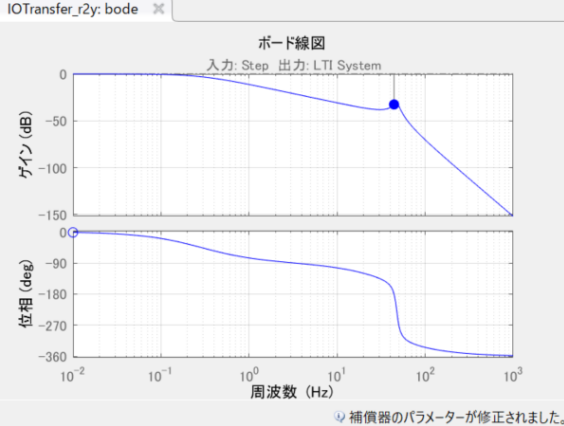
(P制御のゲインを変えた時の閉ループの根の動き)



三菱電機株式会社



閉ループの  
ステップ応答



閉ループの  
ボード線図

マウス操作で、P制御のゲインや根軌跡の根を動かして、その時の閉ループ系のステップ応答、ボード線図を見ながら、補償器のゲインを調整する。

使用ツール

Control System Toolbox™、Simulink Control Design™

# 使用製品

- MATLAB、Simulink
- Simscape、Simscape Electrical
- Control System Toolbox、Simulink Control Design

