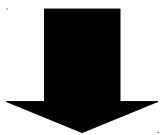


終端状態制御とモデル誤差抑制補償器 によるロバスト制振制御

- 藤岡巧 (熊本大学)
- 岡島寛 (熊本大学)
- 松永信智 (熊本大学)

背景

技術の進歩により工場の機械化



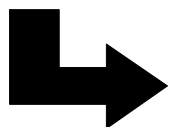
- 作業スピードの向上
- 人件費の削減



<http://etherpod.org/forum/index.php?topic=89.0>

デルタロボット

食品や小物部品の箱詰め作業などのピック&プレースに用いる



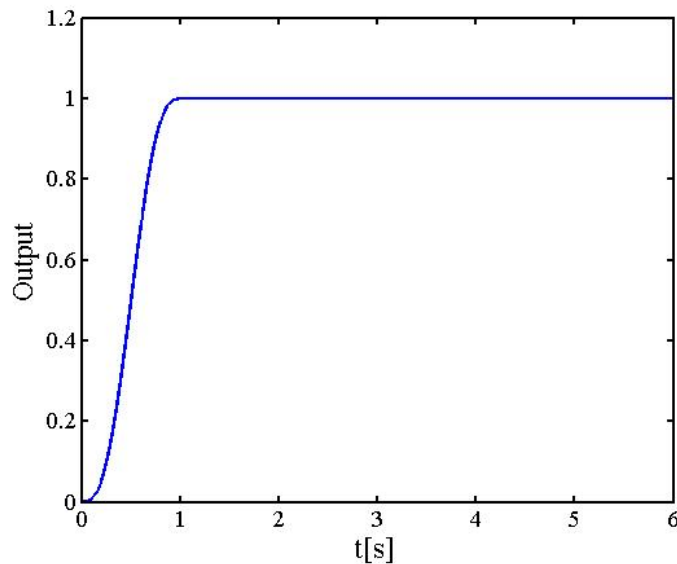
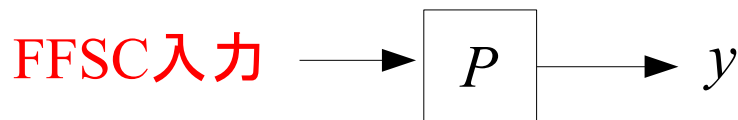
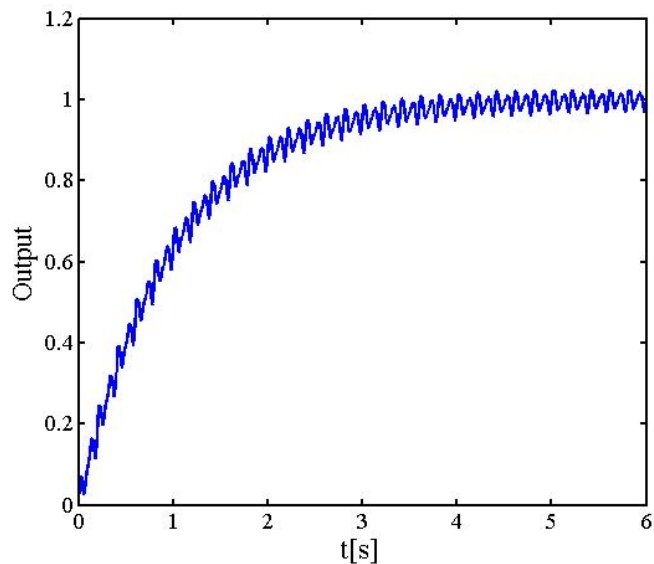
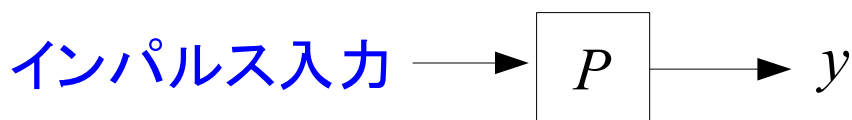
高速で高精度な制御が求められる

高速な制御を行うと機械共振の抑制が困難

背景

終端状態制御 (FFSC) (平田ら 2005年)

- ① 制御対象を初期状態から目標状態に遷移する
- ② 共振周波数を考慮した評価関数を最小化
- ③ フィードフォワード制御系



目的

課題

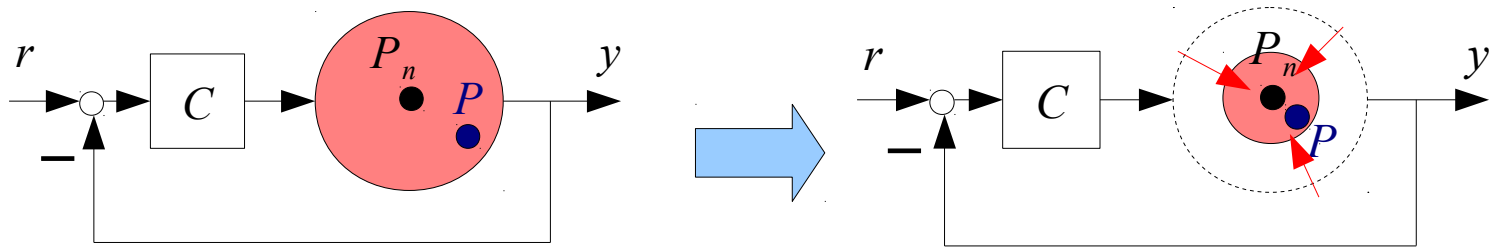
フィードフォワード制御であるためモデル化誤差による影響が大きい

パラメータ変動, 近似誤差など

終端状態制御とモデル誤差抑制補償器(岡島ら 2011年)を併用することでロバストな制振制御を実現する

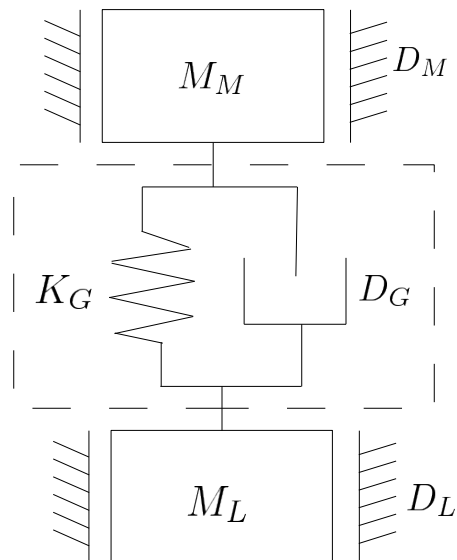
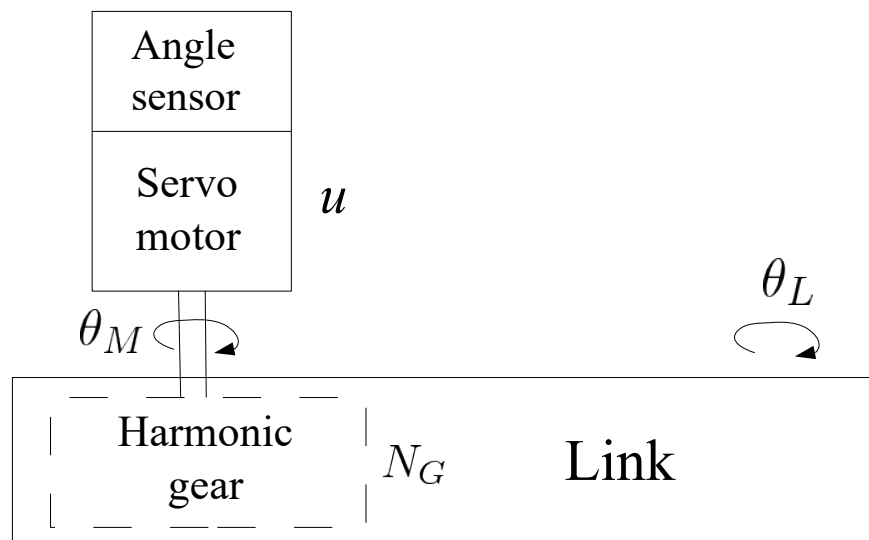
モデル誤差抑制補償器

制御対象とモデル間のギャップ抑制に特化した補償器でロバスト性の確保と制御性能の改善という2つの問題を明確に分離できる



問題設定

減速機付き1軸水平ロボットアームの振動抑制制御を行う



θ_L : リンク回転角 M_L : リンク慣性モーメント D_L : リンク軸粘性摩擦係数
 θ_M : モータ回転角 M_M : モータ回転子慣性モーメント D_M : モータ軸粘性摩擦係数
 D_G : 減速機ねじれ減衰係数 K_G : 減速機バネ係数 N_G : 減速比 u : モータトルク指令入力

動力学方程式

$$M_M \ddot{\theta}_M + D_M \dot{\theta}_M = u - N_G [K_G (N_G \theta_M - \theta_L) + D_G (N_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L)]$$
$$M_L \ddot{\theta}_L + D_L \dot{\theta}_L = K_G (N_G \theta_M - \theta_L) + D_G (N_G \dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L)$$

問題設定

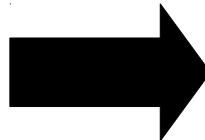
モータ入力 u からリンク回転角 θ_L までの伝達関数

$$P(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s}$$

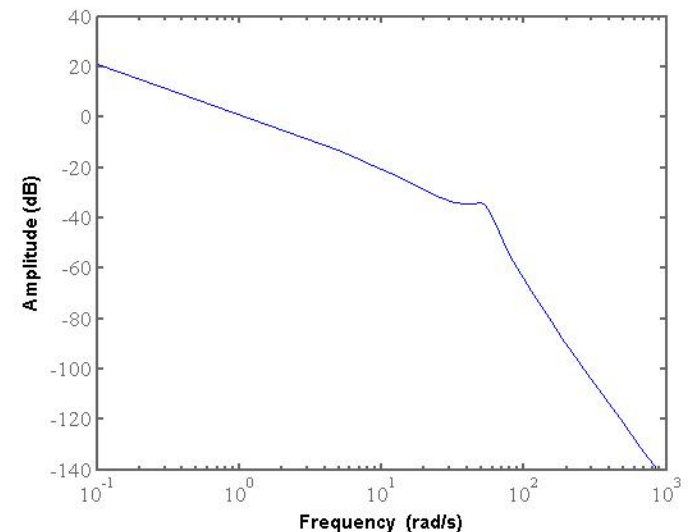
$$\begin{aligned} a_1 &= K_G(D_M + N_G^2 D_L) & a_3 &= M_M D_L + M_M D_G + M_L D_M + N_G^2 M_L D_G \\ a_2 &= M_M K_G + N_G^2 M_L K_G + N_G^2 D_L D_G + D_M D_L + D_M D_G & a_4 &= M_M M_L \\ b_0 &= N_G K_G & b_1 &= N_G D_G \end{aligned}$$

システムパラメータ

M_L	3.4[kgm ²]
M_M	3.3×10^{-4} [kgm ²]
D_L	77[Nms/rad]
D_M	1.2×10^{-3} [Nms/rad]
D_G	5[Nms/rad]
K_G	0.5×10^4 [Nm/rad]
N_G	1/100



制御対象のゲイン線図

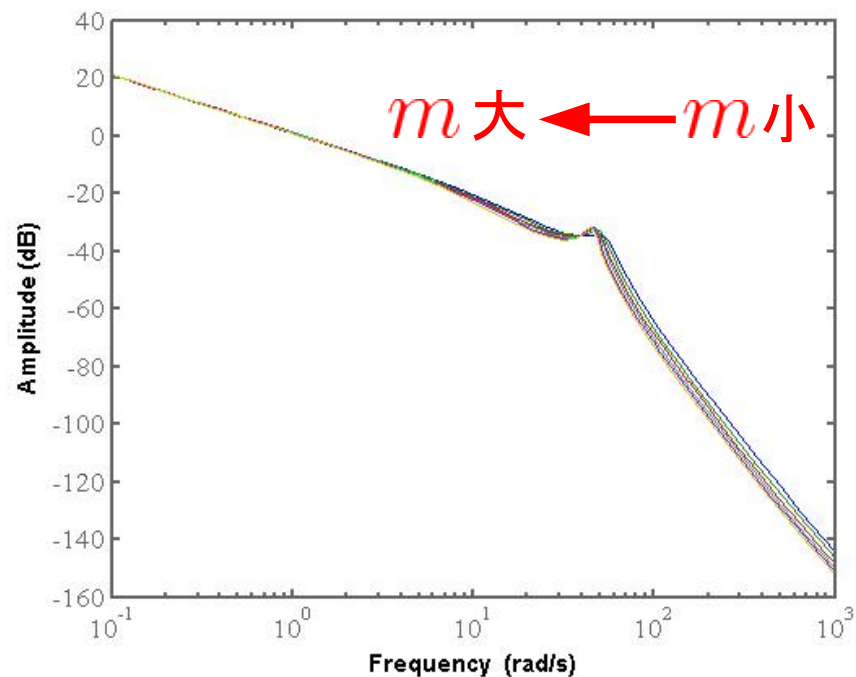
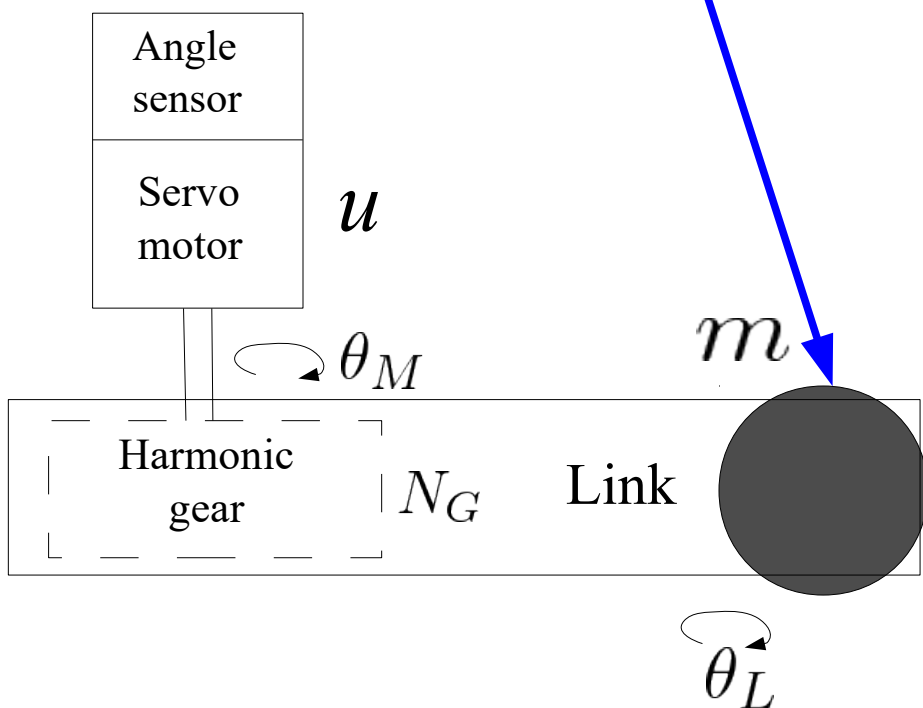


問題設定

手先に5パターンの負荷 m が
かかった場合を考える

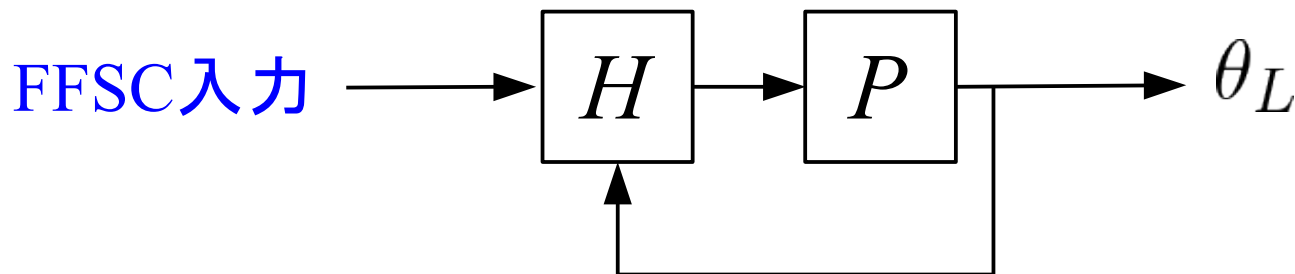
$$m[\text{kg}] = [2, 4, 6, 8, 10]$$

制御対象のゲイン線図



提案制御系

ロバスト制振制御を行うための提案制御系



H : モデル誤差抑制補償器

P : ロボットアーム

FFSC入力



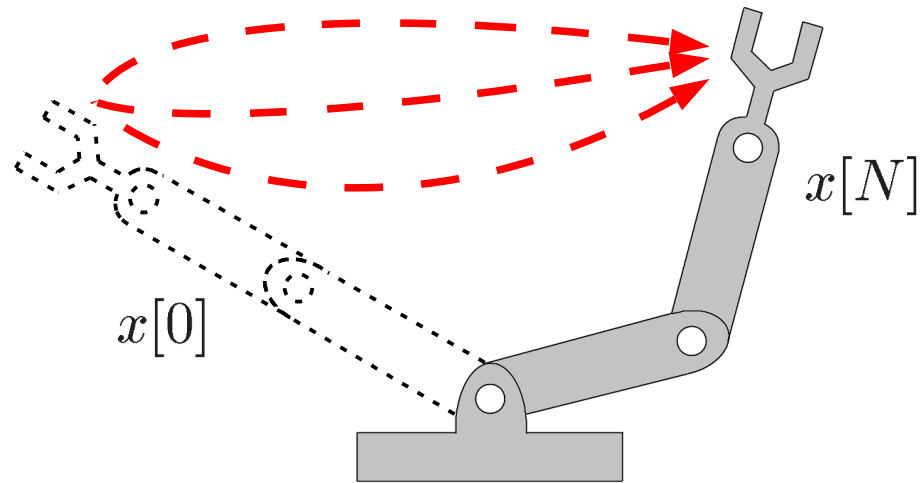
ロボットアームの制振制御

モデル誤差抑制補償器



負荷によるモデル誤差を抑制

FFSC



評価関数 J_ω を最小とするフィードフォワード制御入力 U を求める

$$J_\omega = \sum_{k=0}^{N-1} u^2[k] + \sum_{i=1}^l q_i |\hat{U}_c(\omega_i)|^2 = U^T Q U$$

Q : 重み行列

q_i : 正の重み定数

$\hat{U}_c(\omega)$: $u_c(t)$ のフーリエ変換

ω_i : 任意の周波数点

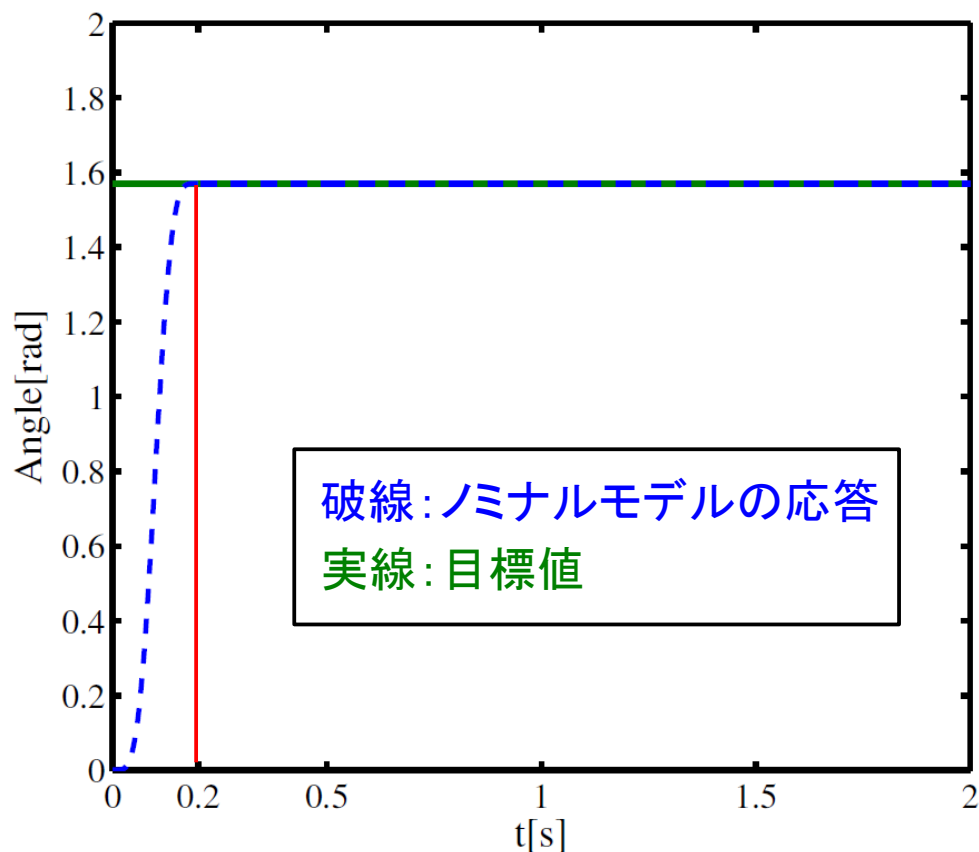
$$U = Q^{-1} \Sigma^T (\Sigma Q^{-1} \Sigma^T)^{-1} (x_d[N] - A_d^N x_d[0])$$

$$(\Sigma = [A_d^{N-1} B_d, A_d^{N-2} B_d, \dots, B_d])$$

シミュレーション

設計したFFSC入力を負荷のないノミナルモデルに印加したときの応答

リンク回転角

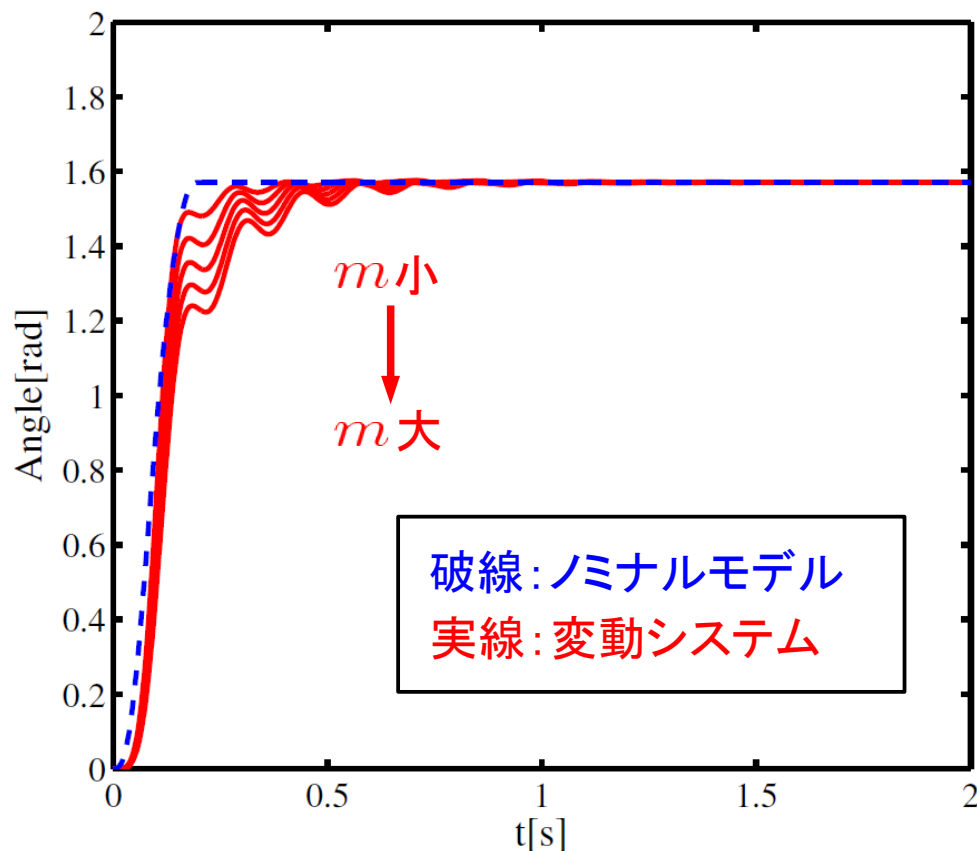


制御区間0.2[s]で目標値に達する所望の応答が得られている

シミュレーション(誤差による影響)

アームの手先に負荷を加えた変動システムに対する応答

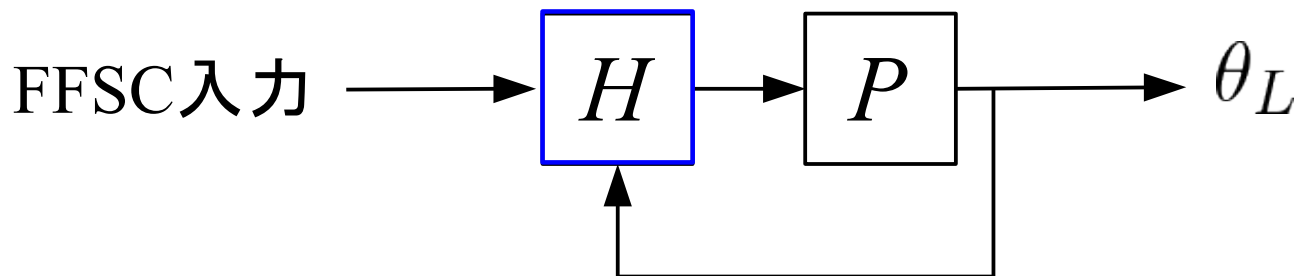
リンク回転角



負荷を加えることで目標到達時間が遅くなるととも振動的になる

提案制御系

ロバスト制振制御を行うための提案制御系



H : モデル誤差抑制補償器

P : ロボットアーム

FFSC入力



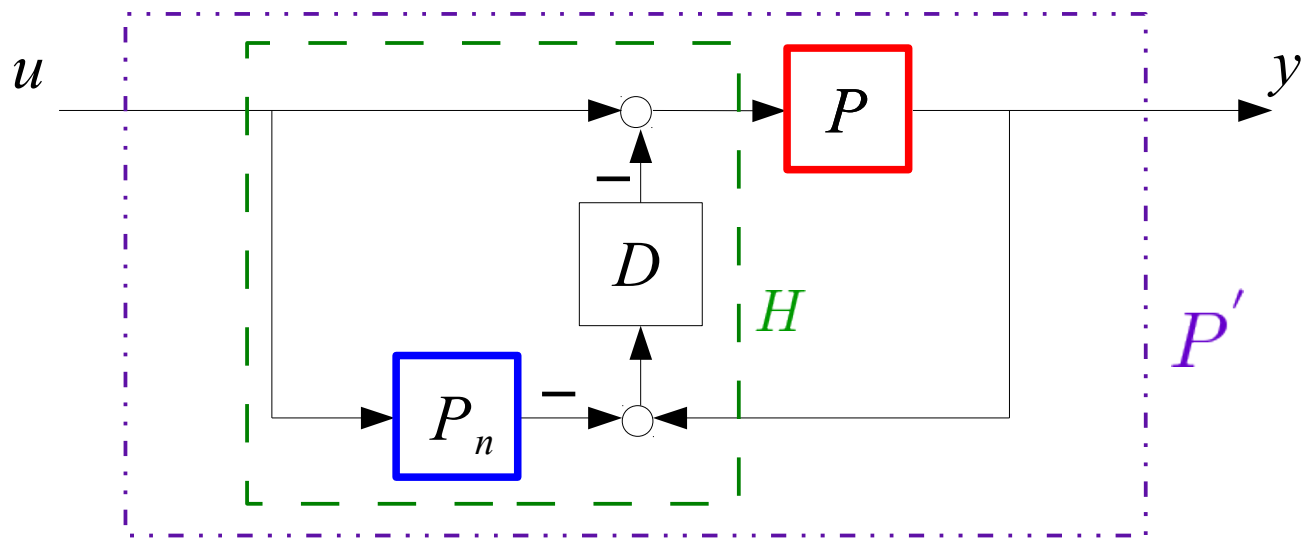
ロボットアームの制振制御

モデル誤差抑制補償器



負荷によるモデル誤差を抑制

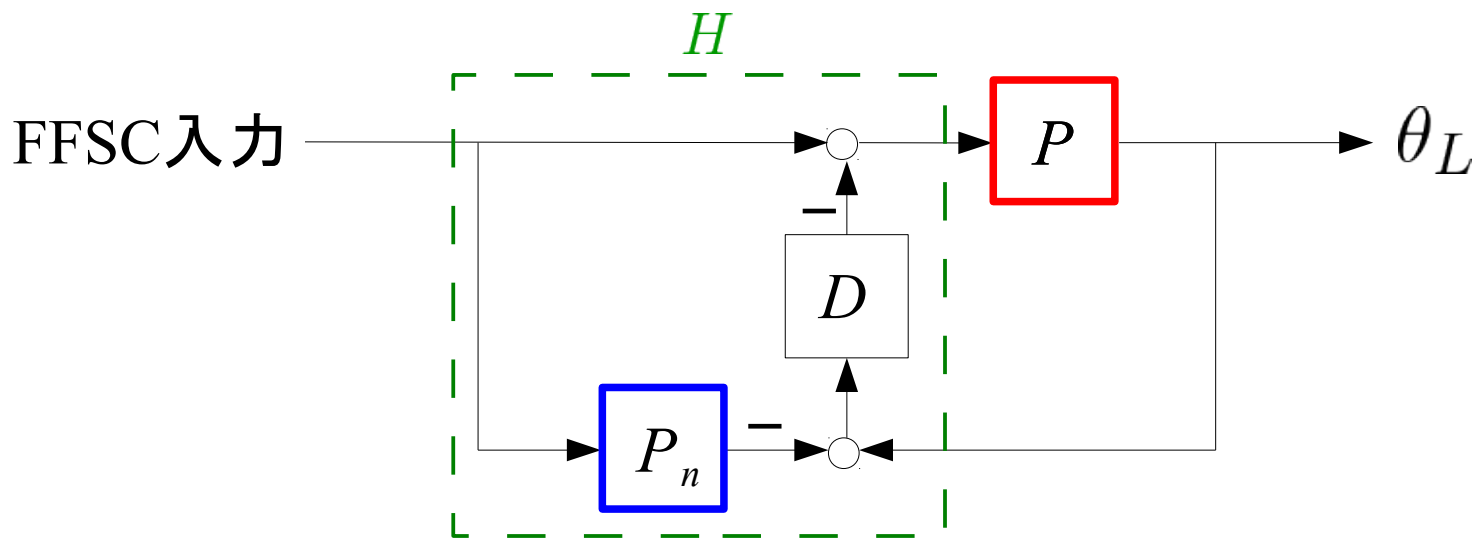
モデル誤差抑制補償器



P_n : ノミナルモデル P : 実プラント D : 誤差補償器

- $P_n(s)$ と $P(s)$ の出力差をフィードバックし誤差補償器 $D(s)$ により誤差を抑制
- $D(s)$ は $P'(s)$ のロバスト安定化制御器である

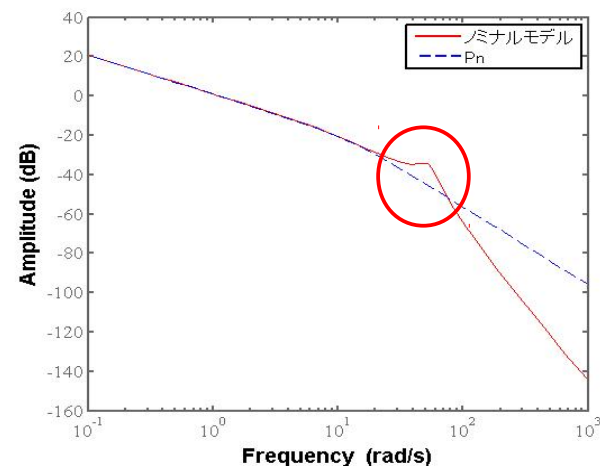
提案制御系



P_n : 剛体モード P : ロボットアーム D : 誤差補償器

P_n にはノミナルモデルの剛体モードを用いる

$$P_n = \frac{0.00553s + 15.4}{s^2 + 13.7s}$$

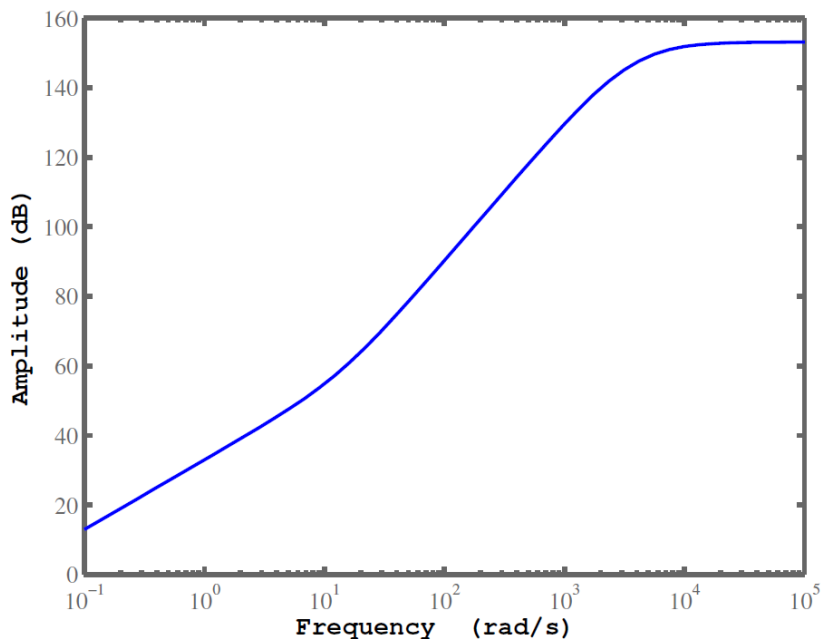


誤差補償器の設計

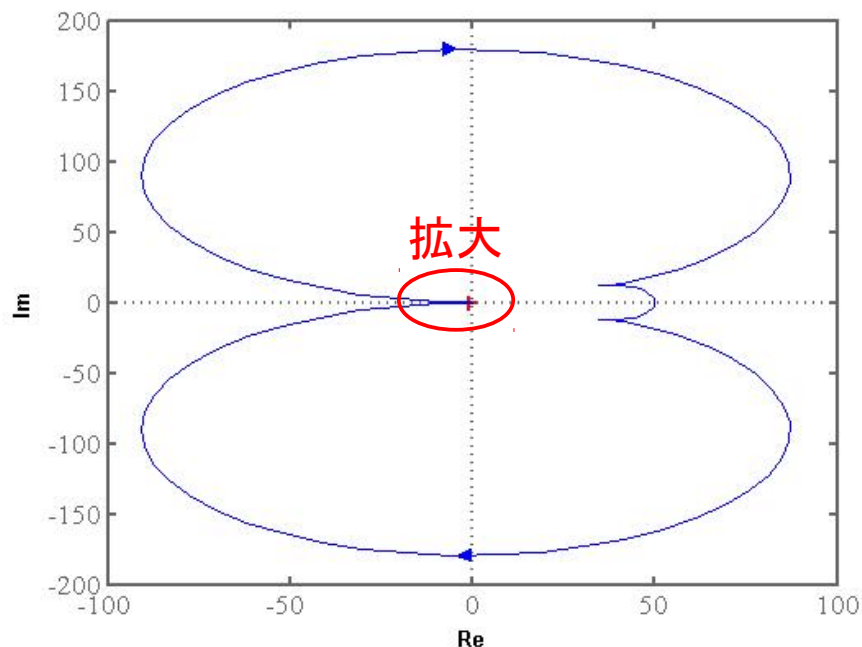
試行錯誤的に誤差補償器 $D(s)$ を設計

$$D(s) = \frac{50}{P_n} * \frac{1}{\frac{1}{5000}s + 1}$$

設計した誤差補償器 $D(s)$



ナイキスト線図($L(s) = P_n(s)D(s)$)

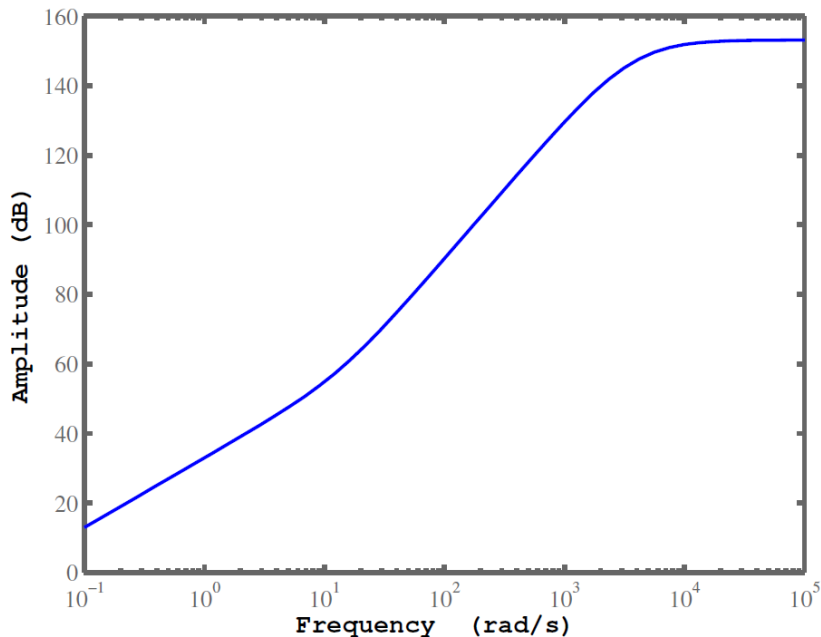


誤差補償器の設計

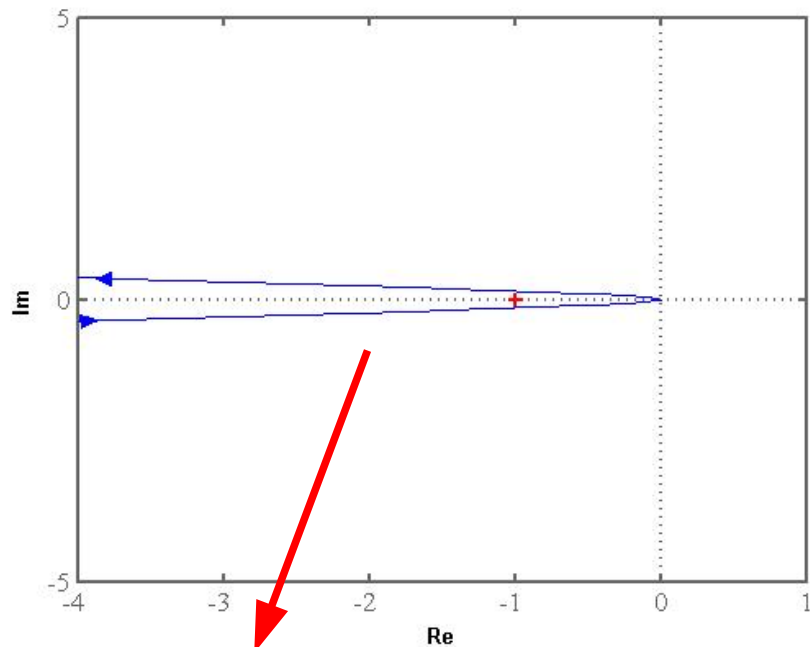
試行錯誤的に誤差補償器 $D(s)$ を設計

$$D(s) = \frac{50}{P_n} * \frac{1}{\frac{1}{5000}s + 1}$$

設計した誤差補償器 $D(s)$



ナイキスト線図($L(s) = P_n(s)D(s)$)

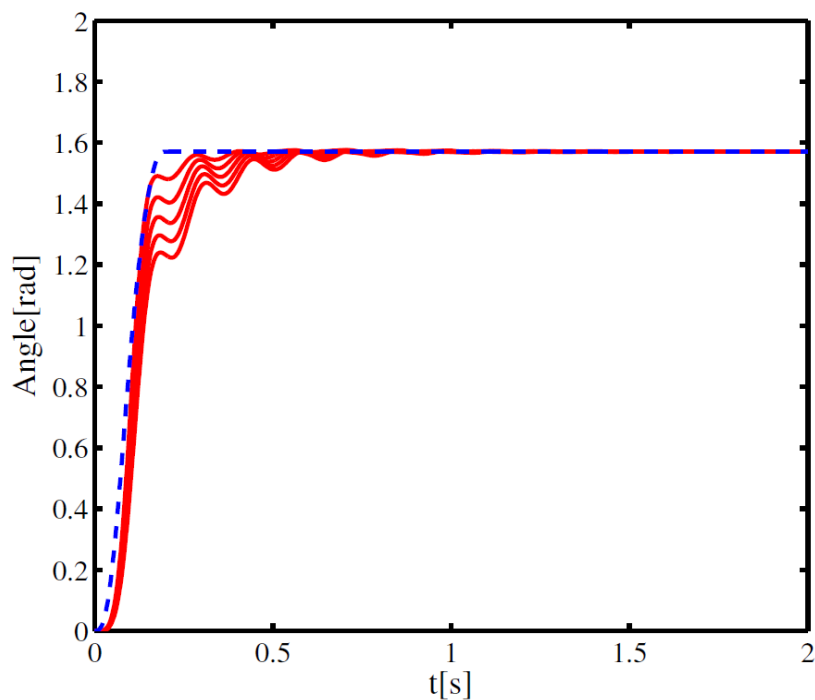


常に実軸-1を左に見ているため安定

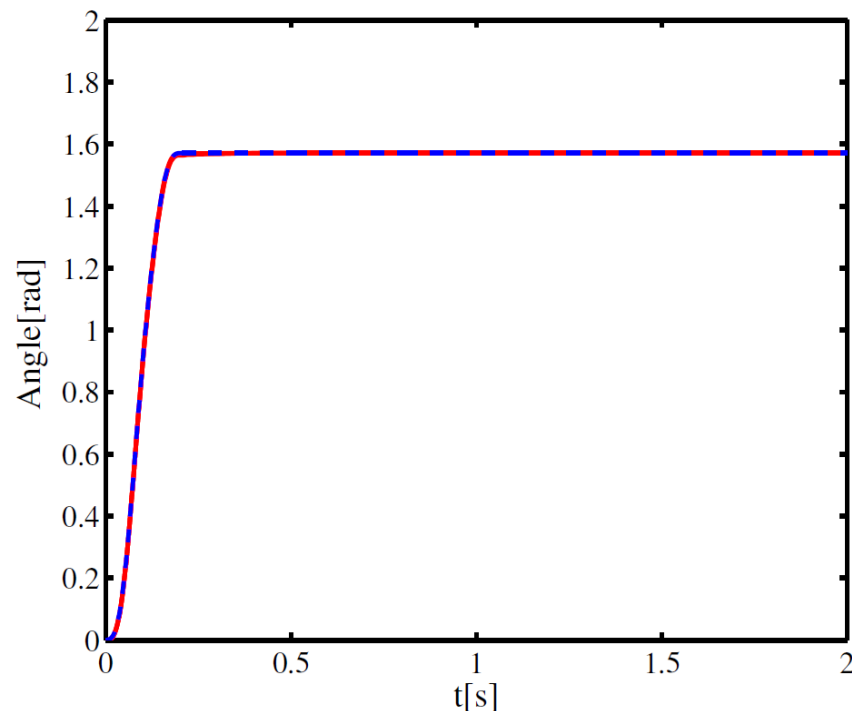
シミュレーション(提案手法)

リンク回転角

FFSCのみ



提案手法



破線:ノミナルモデル 実線:変動システム

モデル誤差抑制補償器と併用することで誤差の影響を抑制できている

まとめ

目的

モデル誤差に対してロバストな制振制御の実現

結論

FFSCとモデル誤差抑制補償器を併用した制御系により
モデル誤差にロバストな制振制御が可能

今後の課題

- 誤差補償器 $D(s)$ の設計法
- 既存の制御手法との比較を行うためにベンチマーク問題への適用
- 実機への適用