モデル誤差抑制補償器を含むフィードバック制御系の安定性解析

○ 梅井啓紀　（熊本大学）
岡島寛　（熊本大学）
浅井徹　（大阪大学）
松永信智　（熊本大学）

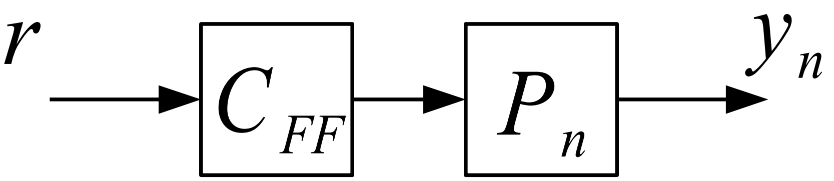
2012.11.18 第55回自動制御連合講演会

研究背景

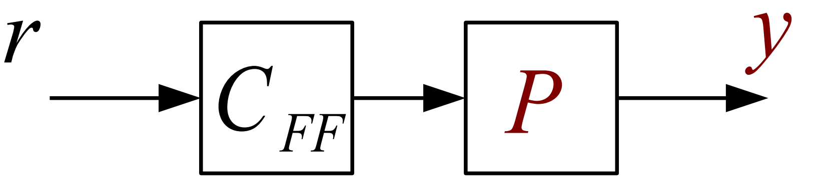
モデルベースド制御

1. 実プラント$P(s)$の動特性を数式的に表現したモデル $P_n(s)$を設定

2. モデル$P_n(s)$に対して
   有効な制御器を設計
   速応性，安定性，etc...



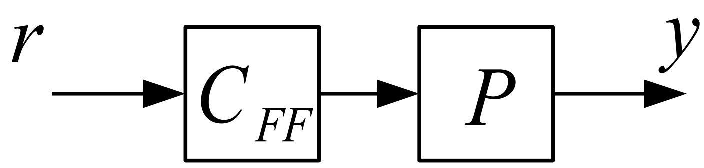
3. 2で設計した制御器を
   実プラント $P(s)$ に適用



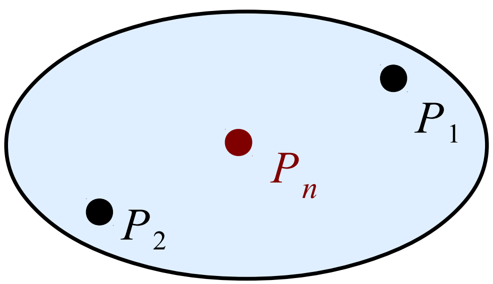
- $\Delta_P(s) = P(s) - P_n(s)$ が十分小さいとき
  設計した制御器により理想応答$y_n(t)$に近い出力が期待できる
- $\Delta_P(s)$ が大きい ＝ 実プラントとモデルにギャップが存在するとき
  制御器を適用しても所望の応答が得られないことがある

研究背景

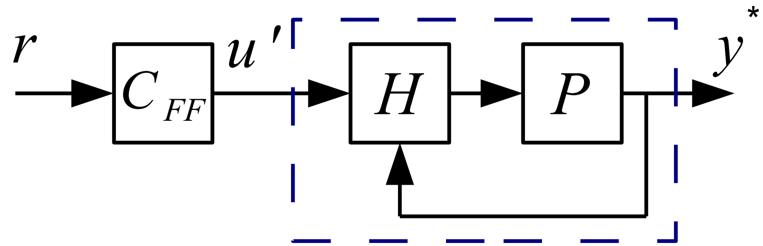
- モデル誤差抑制補償器の提案および開ループ系への適用
  ”A Design Method of Compensator to Minimize Model Error”,
  Umei, Okajima, Matsunaga and Asai, SICE Annual Conference 2011



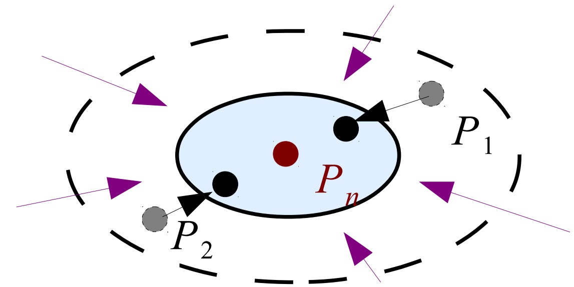
$P(s)=P_n(s)+\Delta_P(s)$



$P(s)$ のモデル集合



$P'(s)=P_n(s)+\Delta_P'(s)$



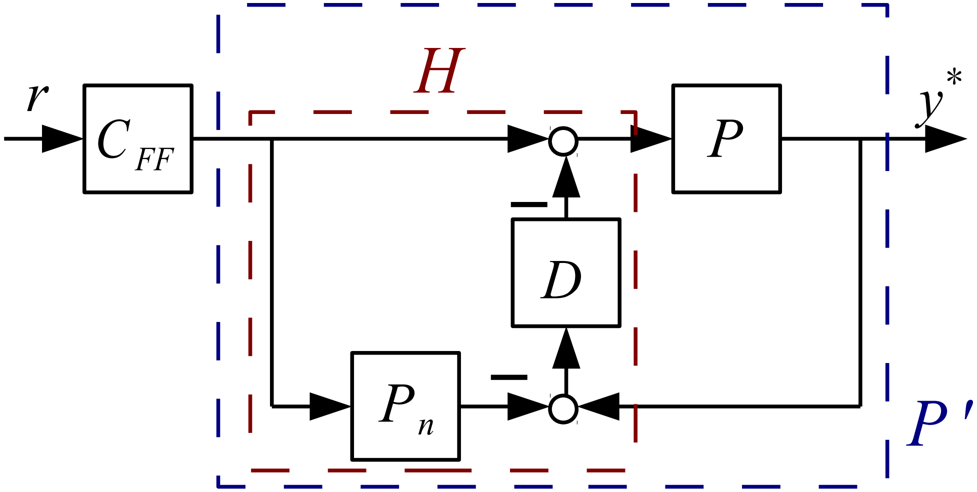
$P'(s)$ のモデル集合

- モデル誤差を抑制し，補償後のシステム $P'(s)$ の入出力特性をノミナルモデル $P_n(s)$ に近付ける
- プラントーモデル間のギャップ抑制に特化した補償器の設計

⇒ 設計問題の分離により他手法との併用が容易になる

先行研究

- モデル誤差抑制補償器の提案および開ループ系への適用
  "A Design Method of Compensator to Minimize Model Error",
  Umei, Okajima, Matsunaga and Asai, SICE Annual Conference 2011



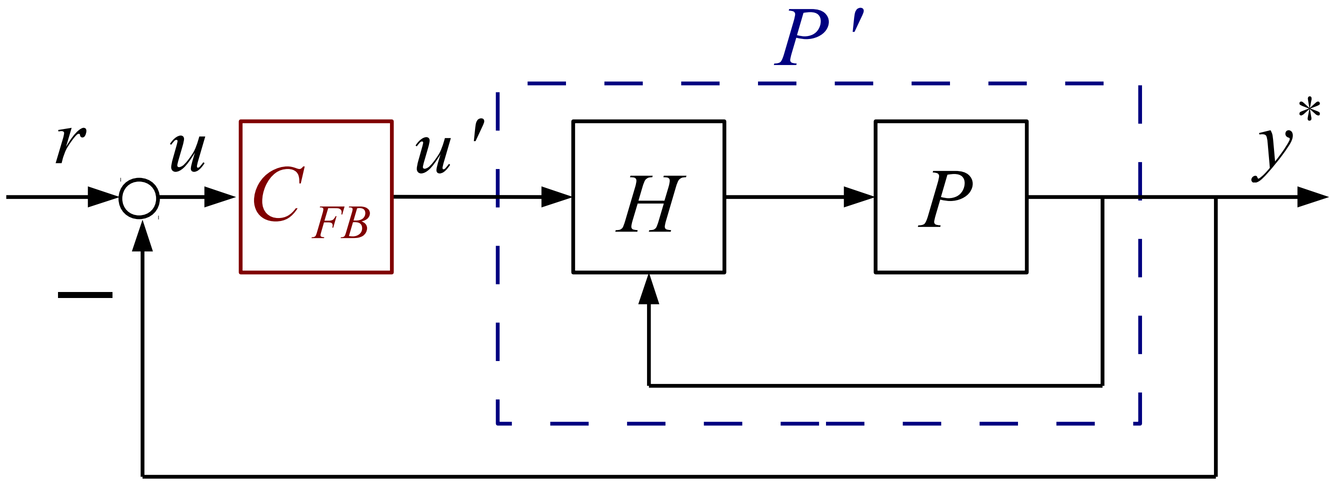
- 実プラント$P(s)$とノミナルモデル$P_n(s)$の出力差をフィードバックすることで両者間のギャップを抑制
- システムの安定性は$P'(s)$の安定性に等しい
- $D(s)$の設計問題は単位フィードバック系の性能問題に帰着する

先行研究

対象が安定なシステムに限定される

本発表の目的

不安定システムに対するモデル誤差抑制補償器の設計

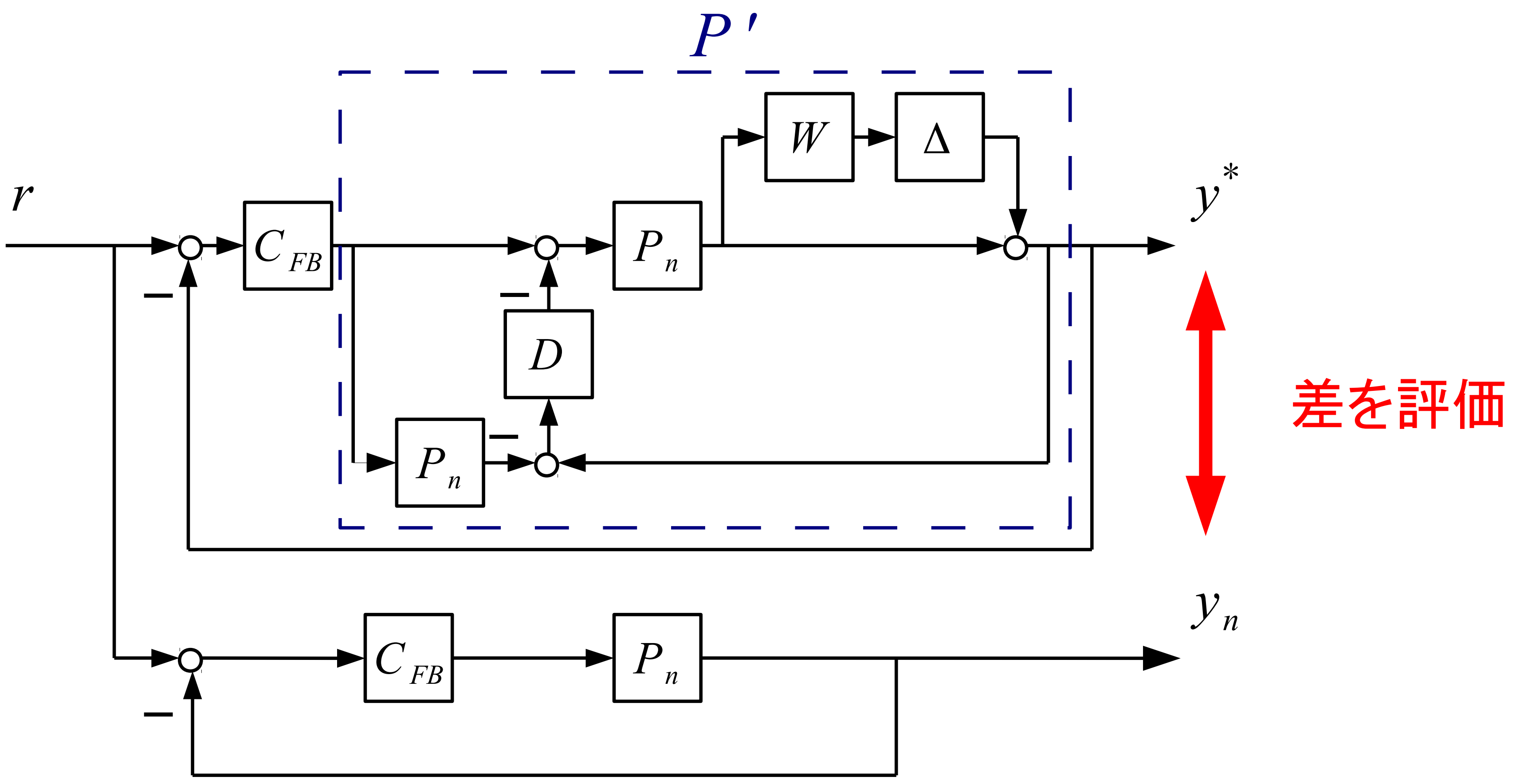


- $P_n(s)$に対して既存手法により安定化制御器$C_{FB}(s)$を設計した後でモデル誤差抑制のための補償器$H(s)$を設計
- 開ループ系の場合と異なり，$P'(s)$だけでなく**システム全体の安定性**を考慮した設計が必要

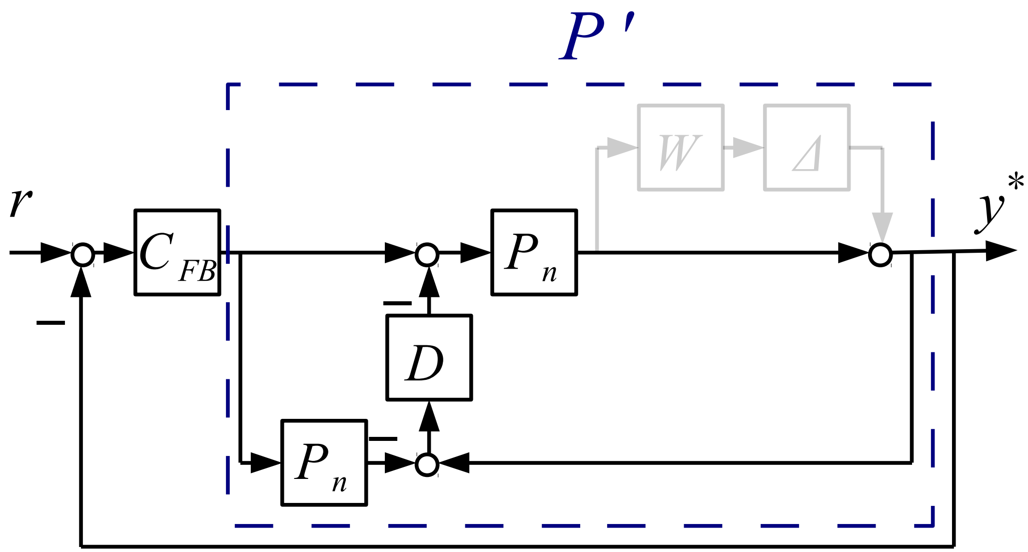
フィードバック系の安定性

プラント $P(s)$ に乗法的不確かさを仮定

$$P(s) = (1 + \Delta(s) W(s)) P_n(s), \quad \|\Delta\|_\infty < 1$$



フィードバック系の安定性



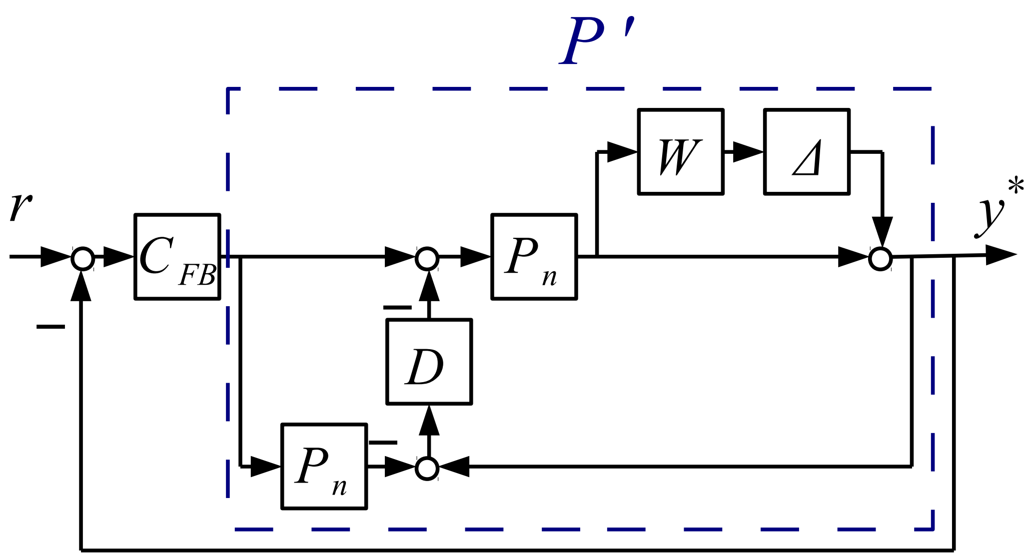
$C_{FB}(s)$ を $P_n(s)$ の安定化制御器とすると，システムの内部安定条件は

$$\frac{P_n(s)D(s)}{1+P_n(s)D(s)},\quad \frac{P_n(s)}{1+P_n(s)D(s)},\quad \frac{D(s)}{1+P_n(s)D(s)}$$

以上3つの伝達関数が安定であることに等しい

補償器$H(s)$を含むフィードバック系の内部安定性は
$L(s)=P_n(s)D(s)$ を一巡伝達関数とする閉ループ系の安定性に等しい

フィードバック系の安定性



- スモールゲイン定理より，任意変動$\Delta(s)$に対する安定条件を求める

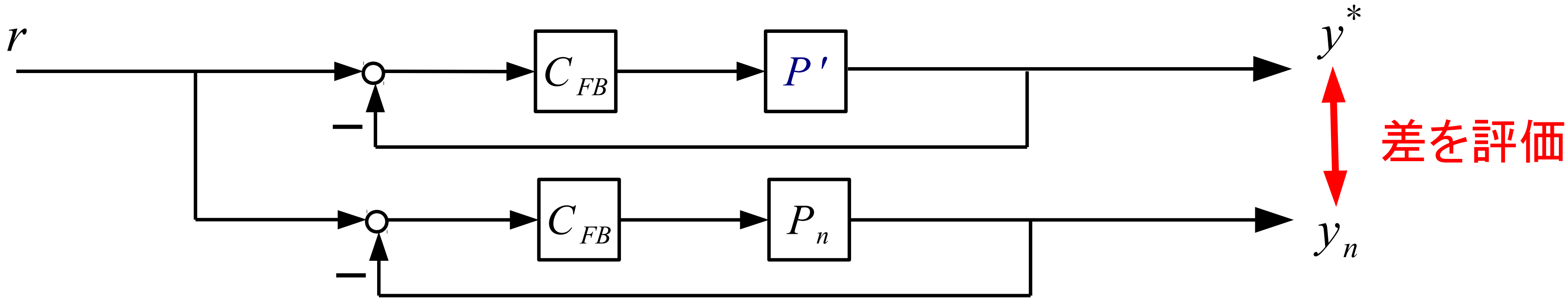
$$
\begin{aligned}
T^*(s) &= \frac{P_n(s)\left(D(s)+C_{FB}(s)+P_n(s)D(s)C_{FB}(s)\right)}{1+P_n(s)\left(D(s)+C_{FB}(s)+P_n(s)D(s)C_{FB}(s)\right)} \\
&= \frac{P_n(s)\left(D(s)+C_{FB}(s)+P_n(s)D(s)C_{FB}(s)\right)}{\left(1+P_n(s)D(s)\right)\left(1+P_n(s)C_{FB}(s)\right)}
\end{aligned}
$$

ロバスト安定条件

$$
\boxed{\|W T^*\|_\infty = \left\| W(s)\frac{P_n(s)\left(D(s)+C_{FB}(s)+P_n(s)D(s)C_{FB}(s)\right)}{\left(1+P_n(s)D(s)\right)\left(1+P_n(s)C_{FB}(s)\right)} \right\|_\infty < 1}
$$

主結果

モデル誤差の評価



$$\frac{\hat{y}^*(s)-\hat{y}_n(s)}{\hat{r}(s)}=\gamma_*(s)\Delta_P(s)$$

ただし，

$$\gamma_*(s)=\frac{C_{FB}(s)}{(1+P_n(s)D(s))(1+P_n(s)C_{FB}(s))^2+\psi(s)}$$

$$\psi(s)=(1+P_n(s)C_{FB}(s))(C_{FB}(s)+D(s)+P_n(s)C_{FB}(s)D(s))\Delta_P(s)$$

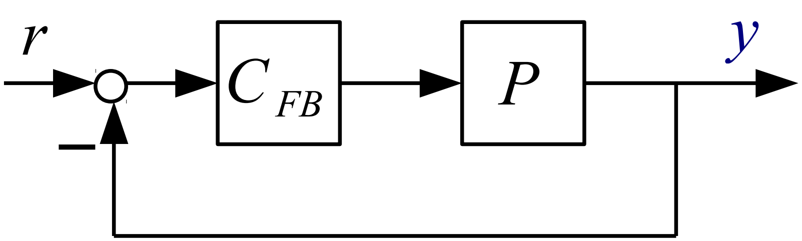
設計問題

以下の条件を満足し，評価値Γ_*を最小化する $D(s)$ を設計する

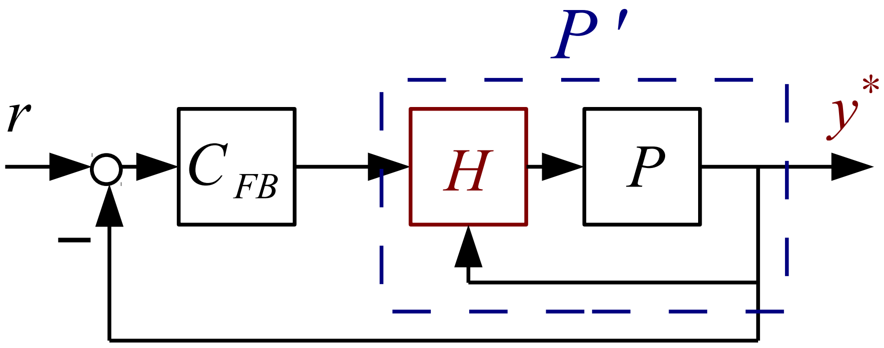
- ロバスト安定条件を満たす
- $L(s)=P_n(s)D(s)$ を一巡伝達関数とする閉ループ系が安定である

$$\Gamma_*=\min_{D(s)}\sup_{\Delta(s)}\|W_e(s)\gamma_*(s)\|_\infty$$

Without compensation



Proposed method



Problem setting

$$P(s) = \frac{K_2(0.4s+1)}{s^2-2s+1}, \qquad P_n(s) = \frac{0.4s+1}{s^2-2s+1}$$

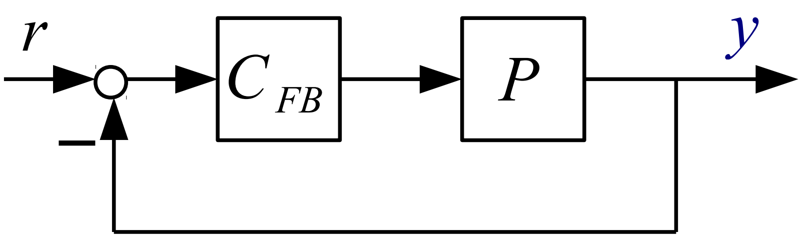
$$K_2 \in [0.5, 1.5]$$

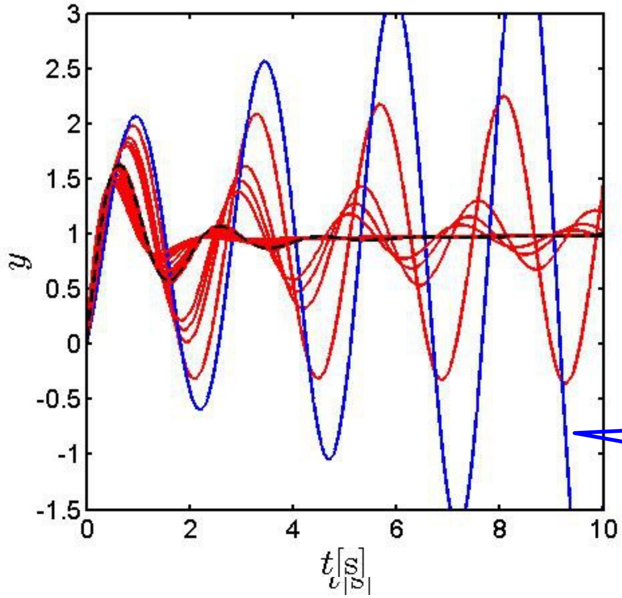
$$C_{FB}(s) = \frac{9.7s+2.3}{s}$$

シミュレーション

Without compensation

Proposed method





Black ：ノミナルモデル
+ FB制御

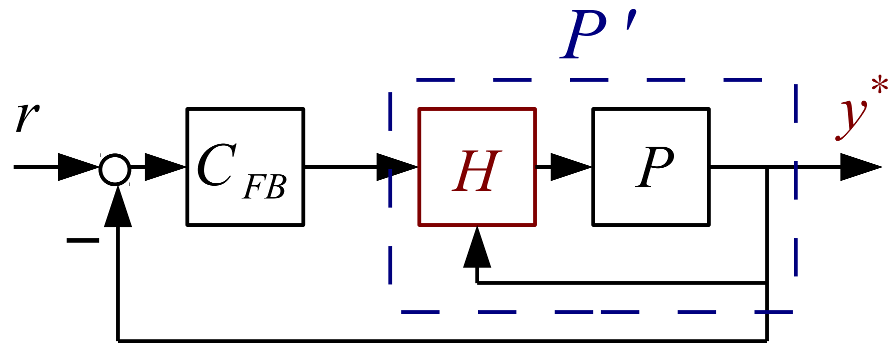
Blue ：プラント(変動あり)
+ FB制御

K_2の値によっては
システムが不安定となる

シミュレーション

Without compensation

Proposed method



Problem setting

$$P(s) = \frac{K_2(0.4s+1)}{s^2-2s+1}, \qquad P_n(s) = \frac{0.4s+1}{s^2-2s+1}$$

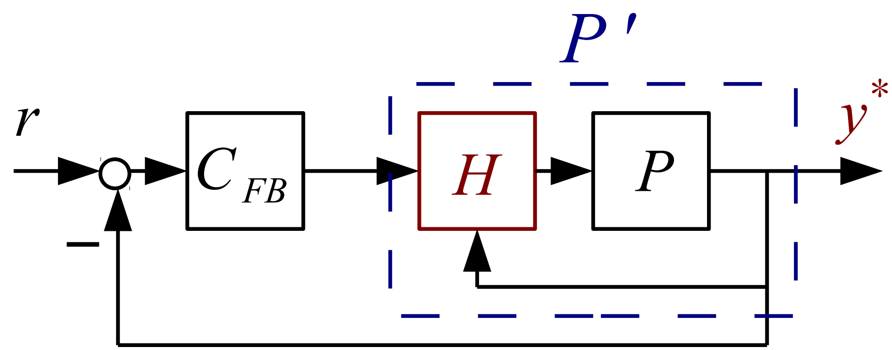
$$K_2 \in [0.5, 1.5]$$

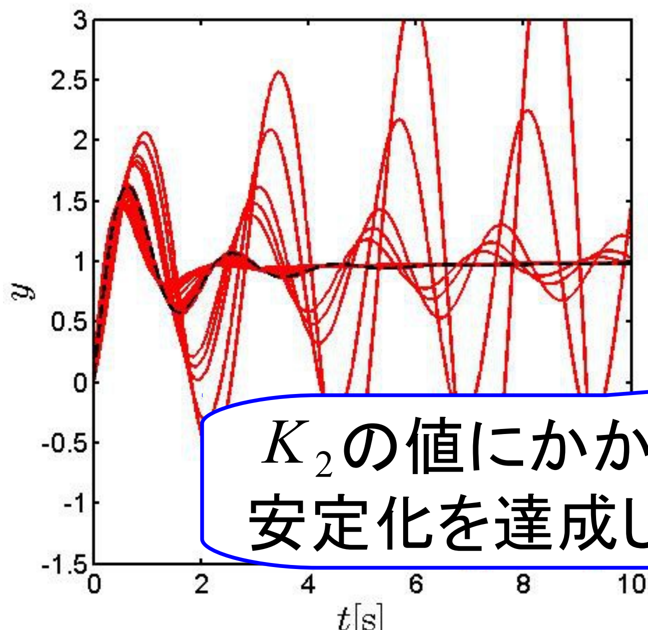
$$C_{FB}(s) = \frac{9.7s+2.3}{s}$$

シミュレーション

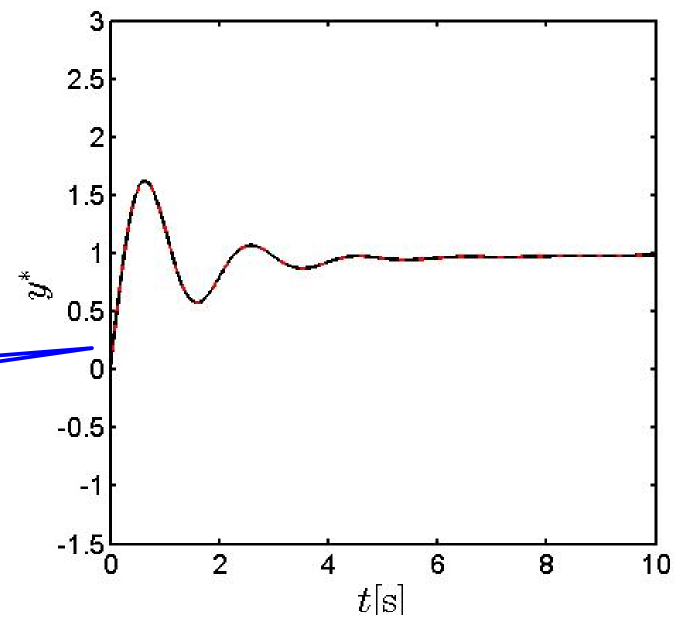
Without compensation

Proposed method





K_2の値にかかわらず
安定化を達成している



まとめ

本発表の目的

不安定システムに対するモデル誤差抑制補償器の設計

- フィードバック系と提案補償器の併用により不安定システムのモデル誤差抑制と性能補償を達成
- フィードバック制御器単体では不安定となる変動に対しても補償器を加えることで対応可能

提案補償器の利点

- 非線形な対象にも適用可能
- 有限整定制御などの既存の様々な制御手法との併用が容易