

# ロバストな入出力線形化を用いた 油圧システムの制御

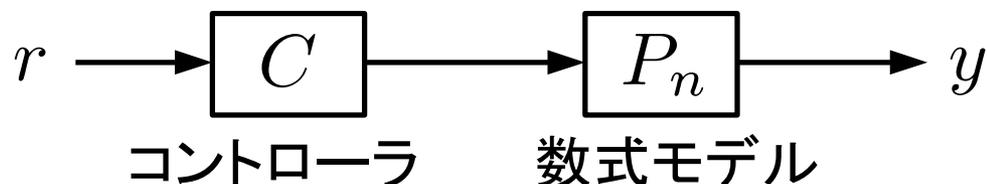
- 金丸 瑛佑(熊本大学)
- 岡島 寛 (熊本大学)
- 松永 信智(熊本大学)

講演番号 201A2

# 背景

一般的に制御系設計は数式モデルを用いた  
モデルベース制御によって行われる

数式モデルに基づいてコントローラを設計



数式モデルを得たい→制御対象の数式化



制御対象



数式化



数式モデル

# 背景

制御対象は線形システムと非線形システムに分類される

## ・線形システム

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u\end{aligned}$$

様々な制御系設計法が  
確立されている  
→コントローラ設計が容易

## ・非線形システム

$$\dot{x} = f(x, u)$$

線形に比べ、確立されている  
制御系設計法が少ない  
→コントローラ設計が難しい

**非線形システムを線形システムへ  
変換する必要がある**

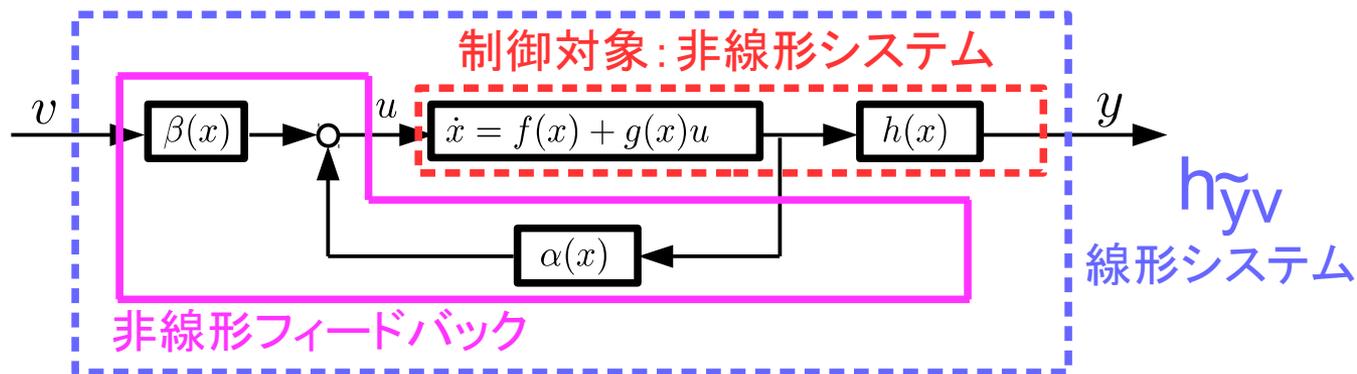
# 従来の線形化手法

フィードバック線形化は非線形システムを線形システムへ変換する有効な手法の1つである

座標変換



非線形  
フィードバック

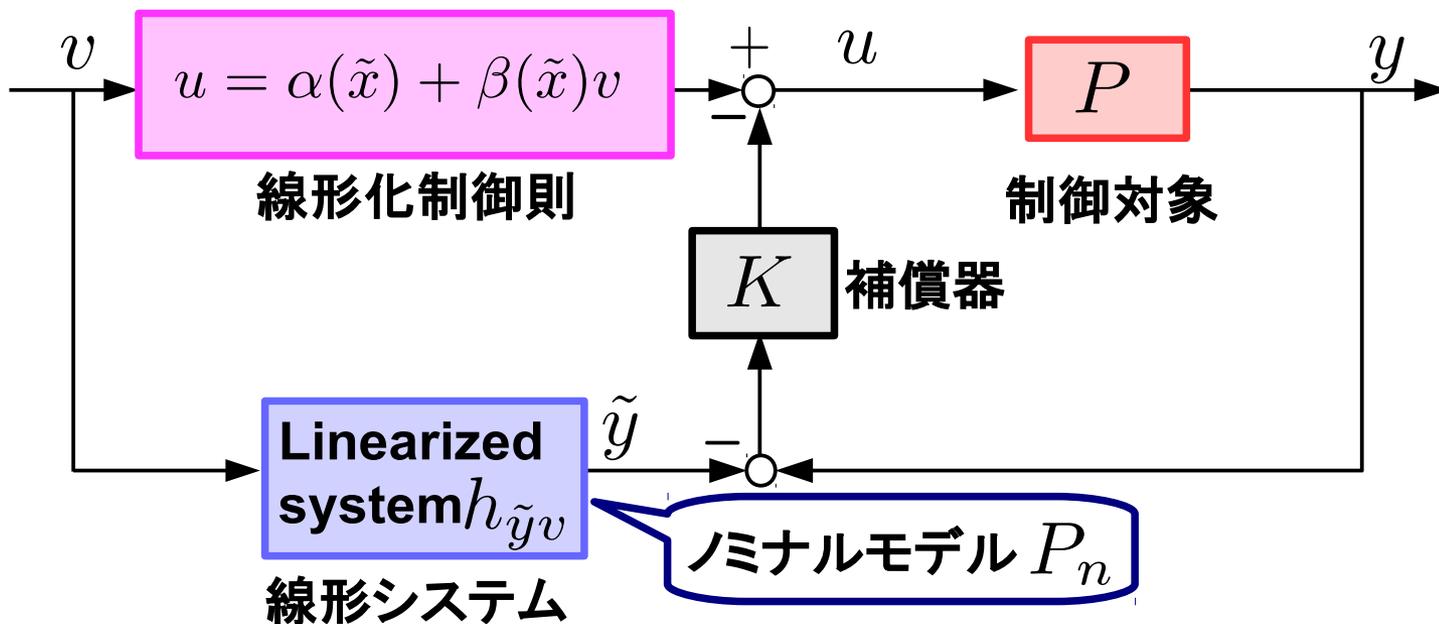


フィードバック線形化は非線形項を打ち消すような線形化  
→近似線形化に比べ**広範囲で線形化可能**

# ロバストな入出力線形化手法

従来の線形化手法はモデル誤差の影響を受けやすい  
→モデル誤差の影響にロバストな入出力線形化を提案

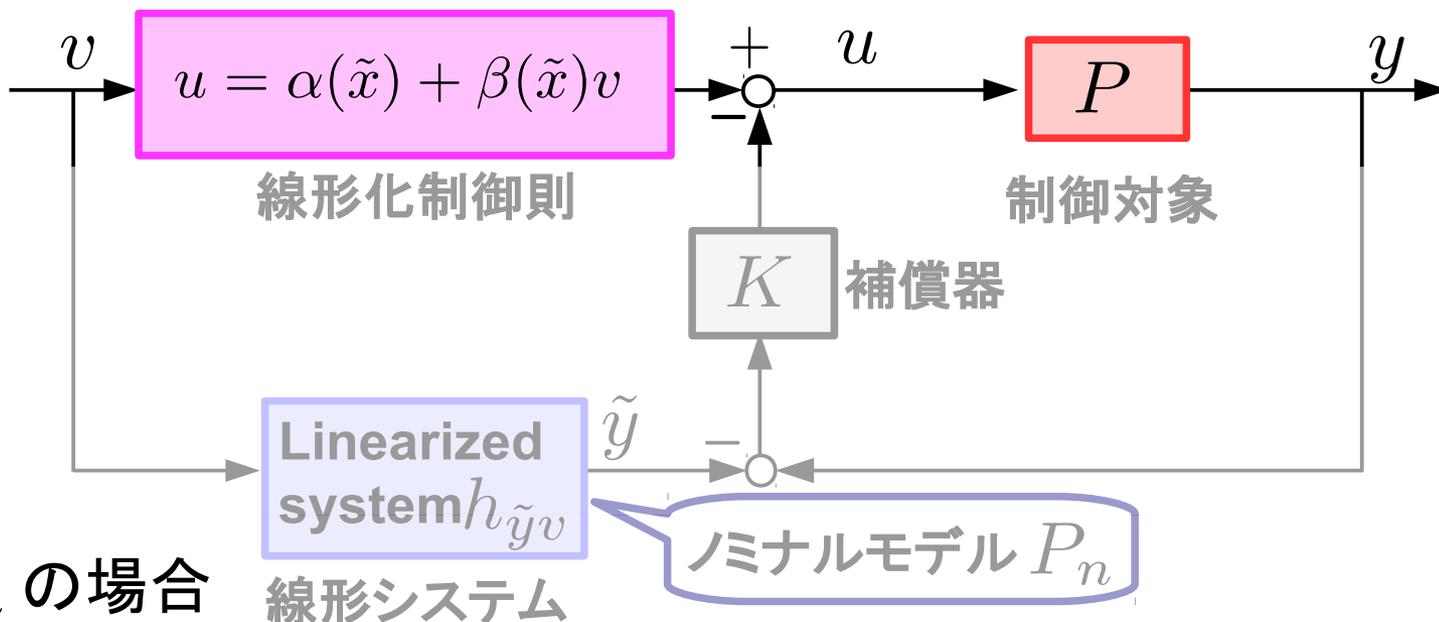
岡島ら, 計測自動制御学会論文集, 2014



# ロバストな入出力線形化手法

従来の線形化手法はモデル誤差の影響を受けやすい  
→モデル誤差の影響にロバストな入出力線形化を提案

岡島ら, 計測自動制御学会論文集, 2014



▶  $P = P_n$  の場合

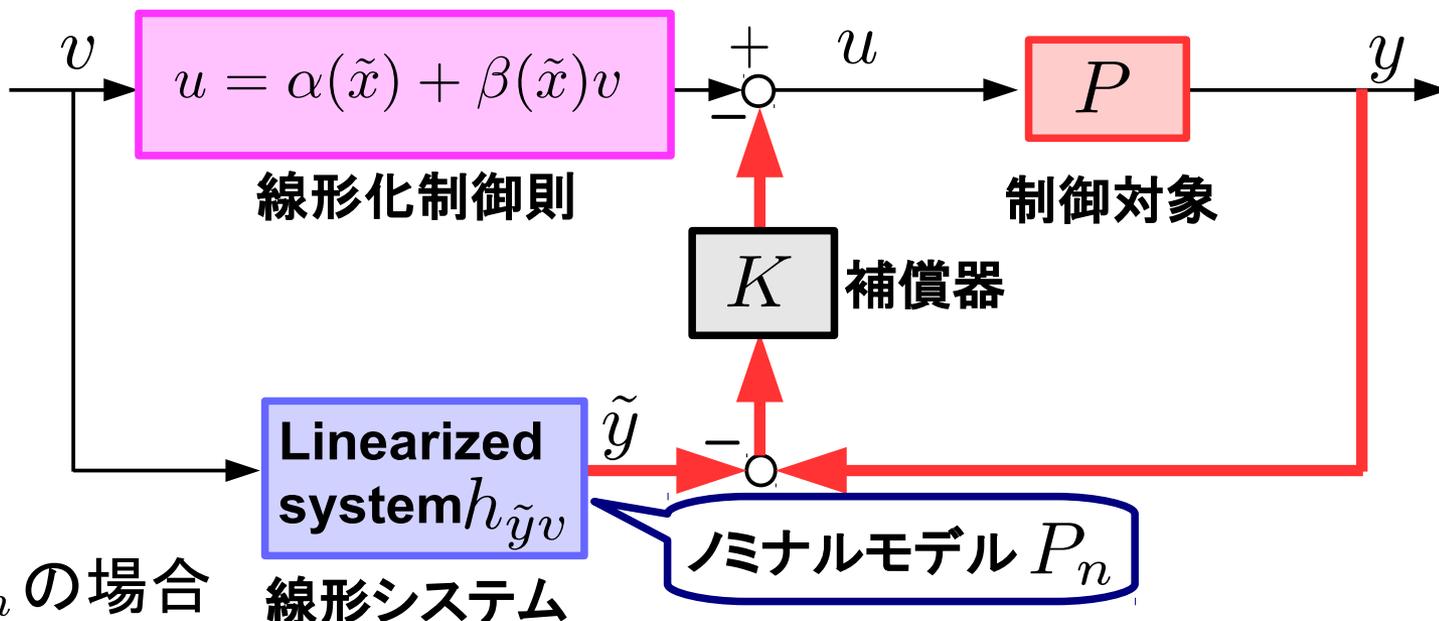
$v$  から  $y$  までの入出力関係は 線形システム  $h_{\tilde{y}v}$  と等価

→線形化を実現

# ロバストな入出力線形化手法

従来の線形化手法はモデル誤差の影響を受けやすい  
→モデル誤差の影響にロバストな入出力線形化を提案

岡島ら, 計測自動制御学会論文集, 2014



$y - \tilde{y}$  の出力フィードバックによりモデル誤差を抑制

→モデル誤差がある場合でも線形化を実現

# 目的

## ロバストな入出力線形化手法の問題点

制御対象を入力に関するアフィンシステムに限定していた

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

## 目的

ロバストな入出力線形化手法をより  
広いクラスの非線形システムへと適用範囲を**拡張**

$$\dot{x} = f(x, u)$$

本発表では…

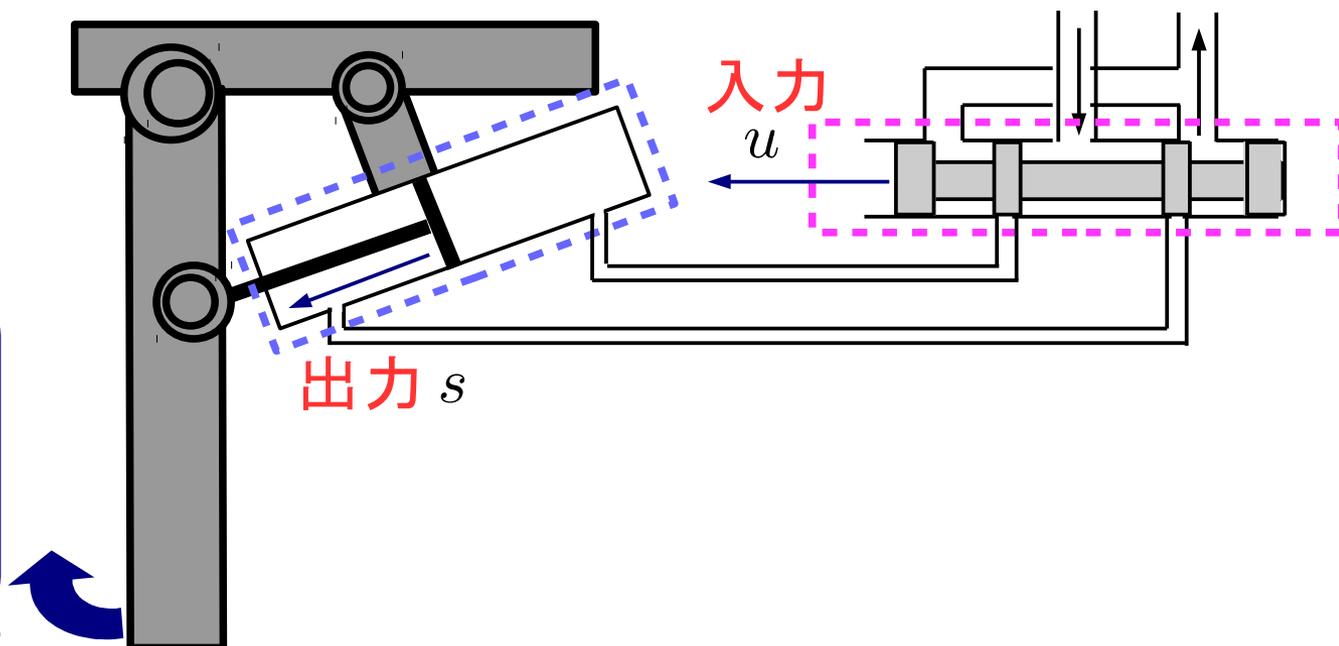
油圧システムへの適用可能性について考察

# 制御対象：油圧システム

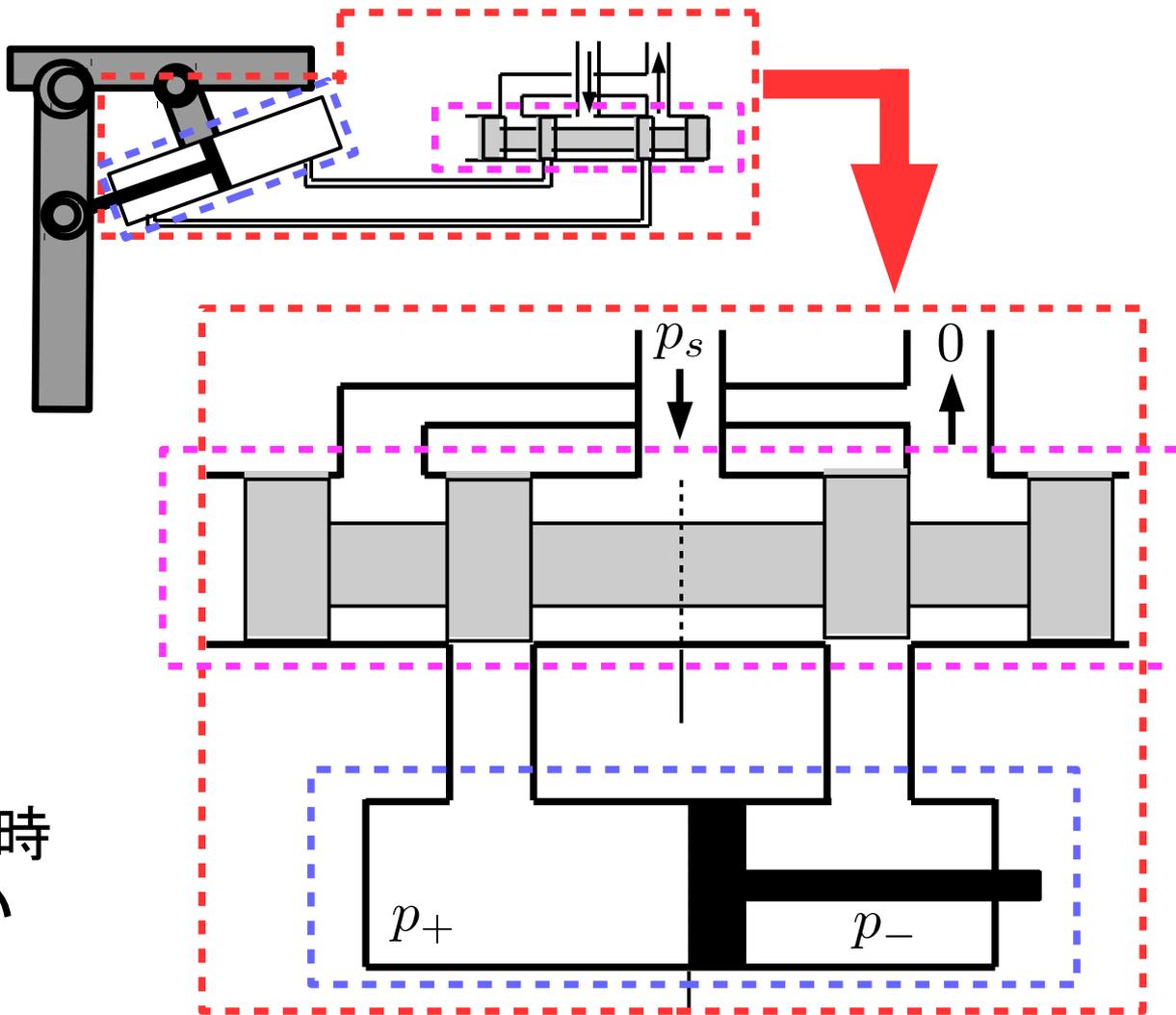
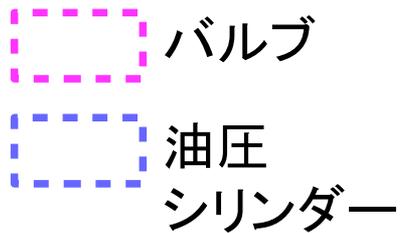
油圧システムは図のようにバルブとシリンダーから構成される



$s$ : ピストン変位  
 $u$ : バルブ変位  
 $p_+$ : キャップ側の圧力  
 $p_-$ : ロッド側の圧力  
 $p_s$ : 供給圧力  
 $0$ : 排出圧力(大気圧)



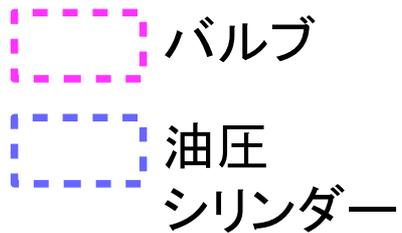
# 制御対象：油圧システム



- s:ピストン変位
- u:バルブ変位
- $p_+$ : キャップ側の圧力
- $p_-$ : ロッド側の圧力
- $p_s$ : 供給圧力
- 0: 排出圧力(大気圧)

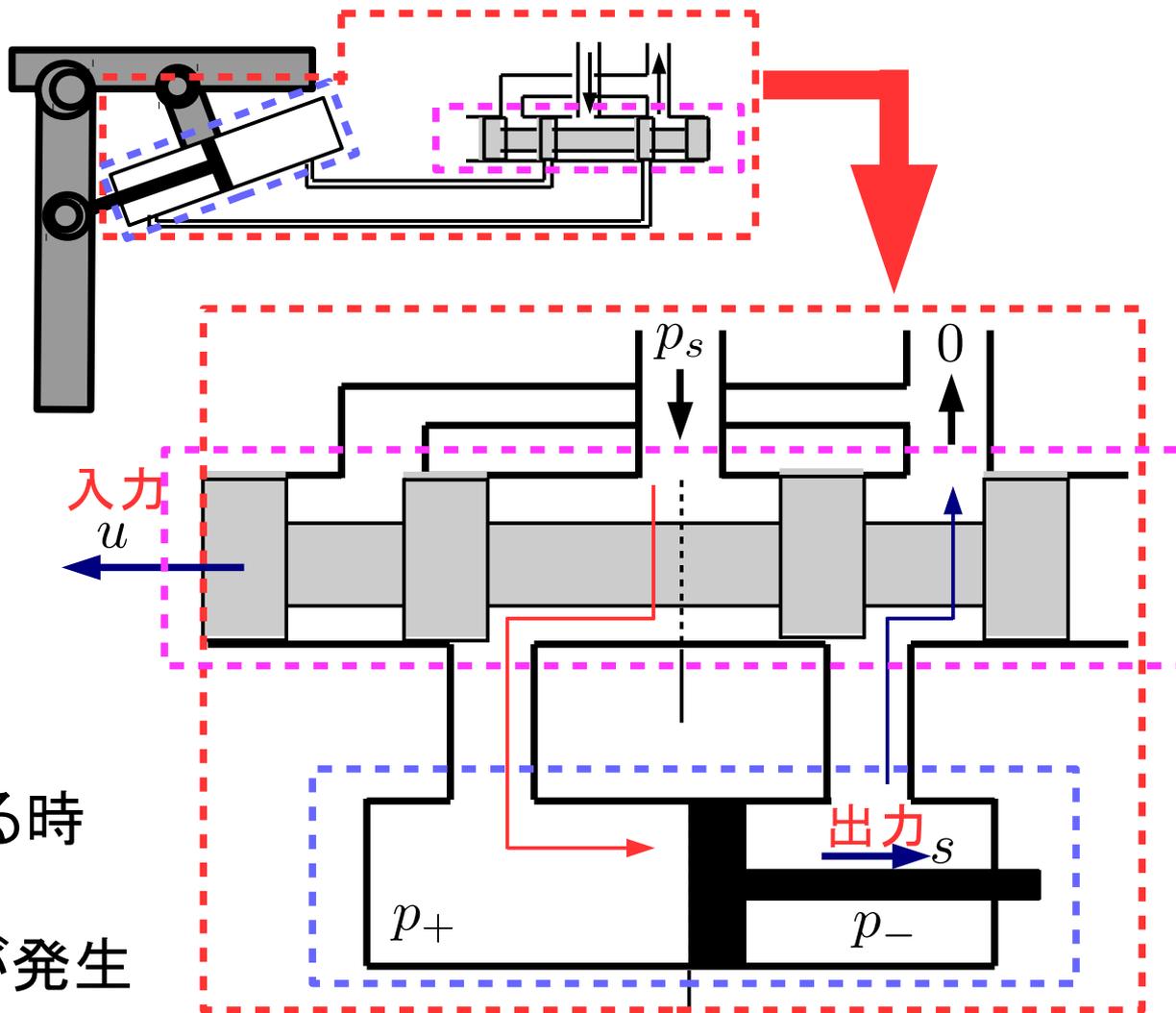
バルブが閉じている時  
ピストンは動かない  
 $p_+ = p_-$

# 制御対象：油圧システム

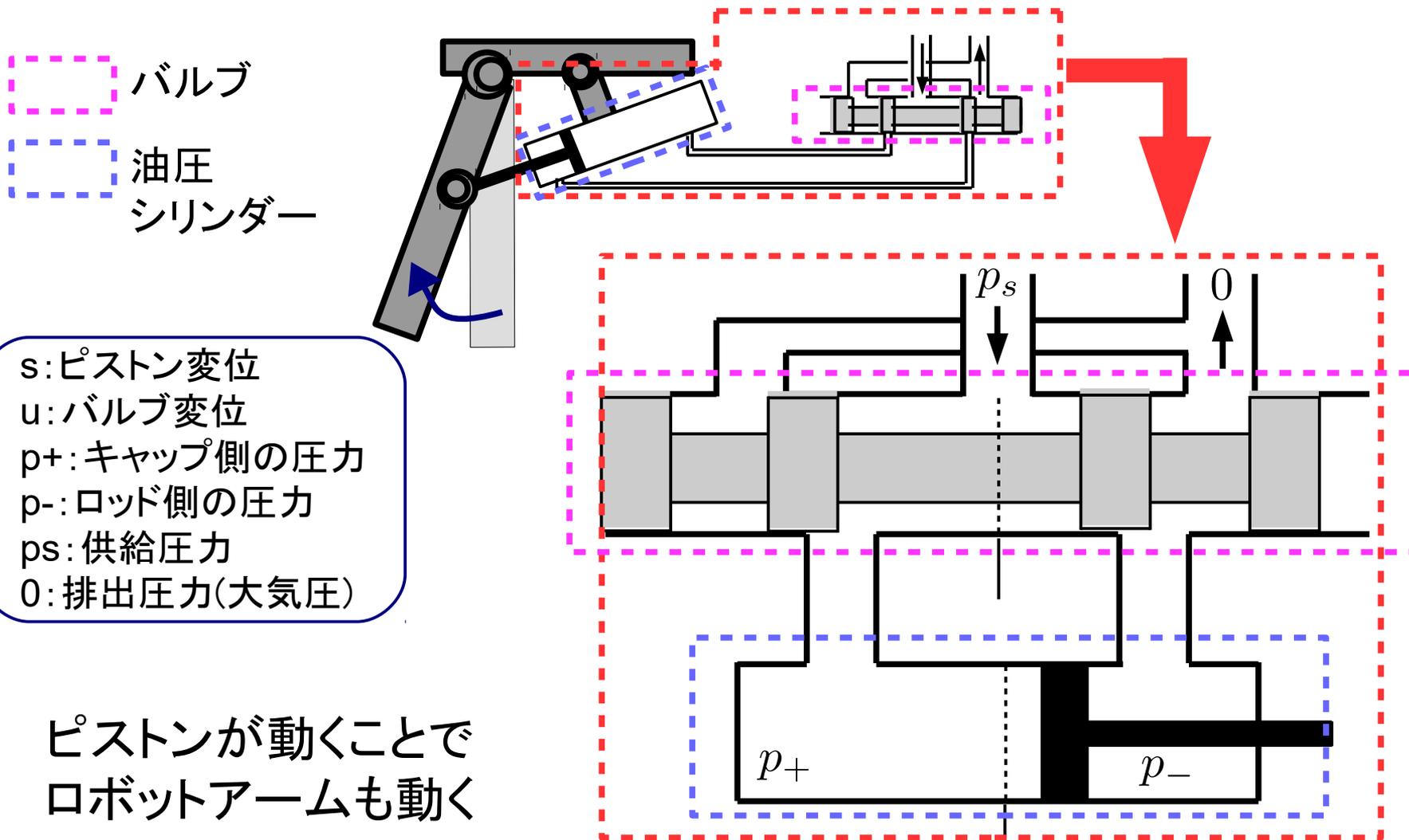


s:ピストン変位  
u:バルブ変位  
 $p_+$ : キャップ側の圧力  
 $p_-$ : ロッド側の圧力  
 $p_s$ : 供給圧力  
0: 排出圧力(大気圧)

バルブが開いている時  
圧力差が生じる  
→ピストンを押す力が発生  
 $p_+ > p_-$



# 制御対象：油圧システム



# 油圧システムのモデル

油圧システムのモデルは次式のように表現される

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{p}_m \\ \dot{p}_+ \\ \dot{p}_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_m}{m} \\ A_+ p_+ - A_- p_- - D \dot{s} \\ \frac{b}{A_+(\frac{L}{2}+s)} (-A_+ \dot{s} + C_{f+} h_+ + u) \\ \frac{b}{A_-(\frac{L}{2}-s)} (+A_- \dot{s} - C_{f-} h_- - u) \end{bmatrix}$$

$$h_+ = \sqrt{\operatorname{sgn}(-u)p_+ + \frac{1 + \operatorname{sgn}(+u)}{2} p_s}$$
$$h_- = \sqrt{\operatorname{sgn}(+u)p_- + \frac{1 + \operatorname{sgn}(-u)}{2} p_s}$$

$x = [s \ p_m \ p_+ \ p_-]^T$  : 状態変数  
u[m]: バルブ変位(入力)  
s[m]: ピストン変位(出力)  
p+[Pa]: キャップ側の圧力  
p-[Pa]: ロッド側の圧力

アフィンシステムのように2つの項に分離不可  
油圧システムはアフィンシステムではない

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

→ロバストな入出力線形化手法を適用することが不可能

# 油圧システムへの適用範囲拡張

油圧システムをアフィンシステムへと変換する

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

油圧システム  $\dot{x} = f(x, u)$

状態変数:  $x = [s \ p_m \ p_+ \ p_-]^T$

入力:  $u$  [m]

出力:  $s$  [m]

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{p}_m \\ \dot{p}_+ \\ \dot{p}_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_m}{m} \\ A_+ p_+ - A_- p_- - D \dot{s} \\ \frac{b}{A_+ (\frac{L}{2} + s)} (-A_+ \dot{s} + C_{f+} h_+ \boxed{u}) \\ \frac{b}{A_- (\frac{L}{2} - s)} (+A_- \dot{s} - C_{f-} h_- \boxed{u}) \end{bmatrix}$$

$$h_+ = \sqrt{\text{sgn}(-\boxed{u}) p_+ + \frac{1 + \text{sgn}(+\boxed{u})}{2} p_s}$$

$$h_- = \sqrt{\text{sgn}(+\boxed{u}) p_- + \frac{1 + \text{sgn}(-\boxed{u})}{2} p_s}$$



状態変数:  $x = [s \ p_m \ p_+ \ p_- \ \boxed{x_u}]^T$

入力:  $\boxed{\dot{u}}$  [m]

- $u$  を新しい状態変数  $x_u$  として定義
- $\dot{u}$  をシステムの新しい入力として定義

# 油圧システムへの適用範囲拡張

油圧システムをアフィンシステムへと変換する

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

油圧システム  $\dot{x} = f(x, u)$

状態変数:  $x = [s \ p_m \ p_+ \ p_-]^T$

入力:  $u$  [m]

出力:  $s$  [m]

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{p}_m \\ \dot{p}_+ \\ \dot{p}_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_m}{m} \\ A_+ p_+ - A_- p_- - D \dot{s} \\ \frac{b}{A_+(\frac{L}{2}+s)} (-A_+ \dot{s} + C_{f+} h_+ u) \\ \frac{b}{A_-(\frac{L}{2}-s)} (+A_- \dot{s} - C_{f-} h_- u) \end{bmatrix}$$

$$h_+ = \sqrt{\text{sgn}(-u)p_+ + \frac{1 + \text{sgn}(+u)}{2} p_s}$$

$$h_- = \sqrt{\text{sgn}(+u)p_- + \frac{1 + \text{sgn}(-u)}{2} p_s}$$

アフィンシステム  $\dot{x} = f(x) + g(x)\dot{u}$

状態変数:  $x = [s \ p_m \ p_+ \ p_- \ x_u]^T$

入力:  $\dot{u}$  [m]

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{p}_m \\ \dot{p}_+ \\ \dot{p}_- \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_m}{m} \\ A_+ p_+ - A_- p_- - D \dot{s} \\ \frac{b}{A_+(\frac{L}{2}+s)} (-A_+ \dot{s} + C_{f+} h_+ x_u) \\ \frac{b}{A_-(\frac{L}{2}-s)} (+A_- \dot{s} - C_{f-} h_- x_u) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{u}$$

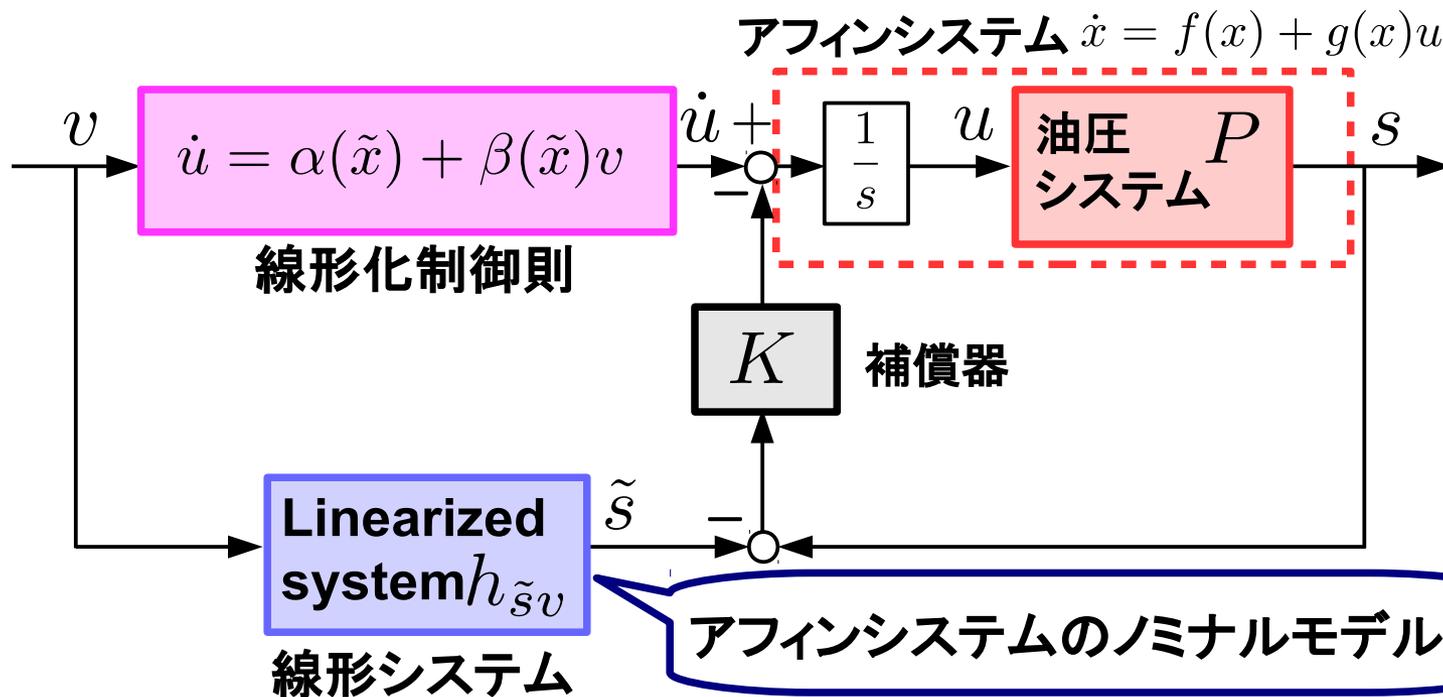
$$h_+ = \sqrt{\text{sgn}(-x_u)p_+ + \frac{1 + \text{sgn}(+x_u)}{2} p_s}$$

$$h_- = \sqrt{\text{sgn}(+x_u)p_- + \frac{1 + \text{sgn}(-x_u)}{2} p_s}$$

油圧システムをアフィンシステムへと変換

→ **ロバストな入出力線形化手法が適用可能となる**

# 油圧システムへの適用



- $\dot{u}$  から  $s$  までの入出力関係はアフィンシステム
- $\dot{u}$  から  $s$  までの入出力関係が線形化される
- 通常のロバストな入出力線形化と同様の効果が期待される

# シミュレーション

シミュレーションの目的: 油圧システムに対する有効性の検証



パラメータ名	数値
キャップ断面積 $A_+$	$2.027 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$
ロッド断面積 $A_-$	$1.069 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$
等価質量 $m$	6656[kg]
粘性摩擦係数 $D$	1240[Ns/m]
流量係数 $C_{f+}$	$3.59 \times 10^{-10} [\text{m}^2/(\text{sPa}^{1/2})]$
流量係数 $C_{f-}$	$3.721 \times 10^{-10} [\text{m}^2/(\text{sPa}^{1/2})]$
体積弾性係数 $b$	$2.71 \times 10^8 [\text{Pa}]$
ストローク $L$	1.2[m]
ポンプ供給圧力 $p_s$	$6.9 \times 10^6 [\text{Pa}]$

ノミナルモデルのパラメータ

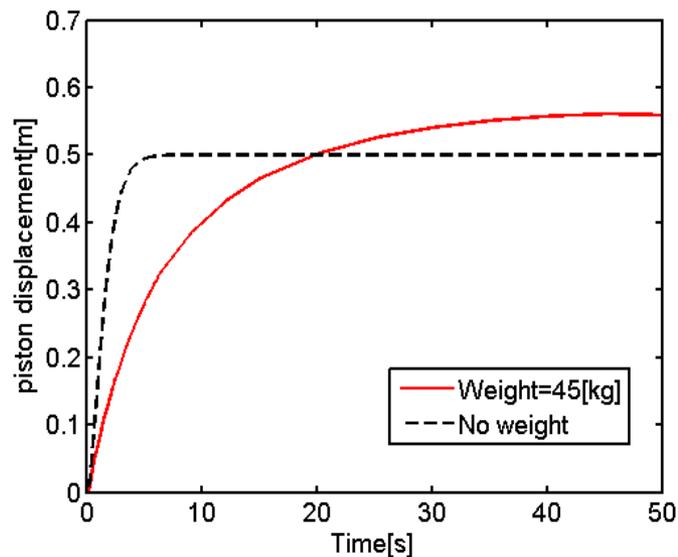
▶ 目標値  $r = 0.5[\text{m}]$  の時のステップ応答

▶ 補償器  $K(s) = 400 + 400 \left( \frac{s}{\frac{1}{100}s + 1} \right)$

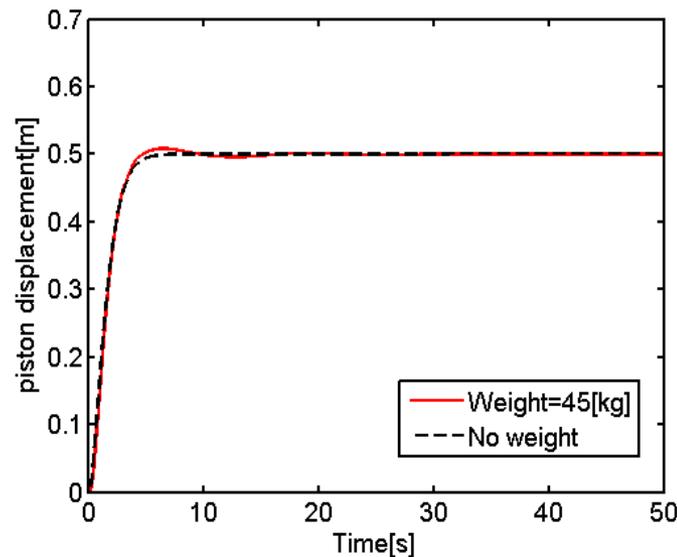
(PD制御器)

# シミュレーション

従来線形化手法とロバストな入出力線形化手法を適用した結果を比較



フィードバック線形化  
(従来線形化手法)



ロバストな入出力線形化手法

ロバストな入出力線形化手法の方は破線にほぼ一致  
→ロバストな入出力線形化手法は油圧システムに有効である

# まとめ

## 目的

ロバストな入出力線形化手法をより  
広いクラスの非線形システムへと適用範囲を**拡張**

## 結論

ロバストな入出力線形化手法を油圧システムへと  
適用範囲を**拡張**し、シミュレーションにより有効性を示した