

平成 30 年度 修士論文

題目

タイトル

— サブタイトル —

指導教員

石川 将人 教授

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

学籍番号 28E17076

名前

2016 年 2 月 xx 日

# 概要

卒業論文を L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X で書くときに参考になればと思い作りました. なぜかコンパイルできない, Word みたいな微調整ができなくて体裁が整わないなどの “L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X あるある” で, 無駄に時間を費やさないように, 本来時間を割くべきところにきちんと時間を割けるようにしましょう.

本テンプレートは使用を強要するものではありません. すでに Share フォルダ内に, 末岡先生が作られた大須賀研用のテンプレがありますのでそれを用いても構いません. あるいは自分で論文体裁を整えてもらっても構いません. 要するに論文が書ければそれでいいのです.

## Abstract

This paper discusses ...

# 目次

第 1 章	力制御	1
1.1	力推定アルゴリズム . . . . .	1
1.2	PID 制御と I-PD 制御 . . . . .	1
1.3	$H_\infty$ 制御 . . . . .	2
1.4	I-PD 制御と $H_\infty$ 制御の応答および外乱抑制効果の比較 . . . . .	9
参考文献		12

# 目次

1.1	Block Diagram for Force Control . . . . .	2
1.2	PID and I-PD Controller . . . . .	3
1.3	Sin Responce of Estimated Force and Measured Force (PID Controller and I-PD Controller) . . . . .	4
1.4	Mixed $H_\infty$ Synthesis . . . . .	5
1.5	Servo $H_\infty$ Controller . . . . .	6
1.6	Step Responce of Estimated Force and Measured Force ( $H_\infty$ servo controller w/o dead time) . . . . .	7
1.7	Step Responce of Estimated Force and Measured Force ( $H_\infty$ servo controller w/ Padé approximation of dead time) . . . . .	8
1.8	Step Responce of Estimated Force and Measured Force . . . . .	10
1.9	Sin Responce of Estimated Force and Measured Force . . . . .	11

## 表目次

# 第 1 章

## 力制御

油圧システムの力制御については、センサを取り付けて直接力を測定したり、式 ?? に  
よる推力をそのままシリンダの出力として用いる方法がとられてきた [1, 2, 3, 4]. 本章で  
は、 $G_{f_{thrust}2f_{measure}}$  を用いて出力を推定する推定アルゴリズムおよび制御器の設計とそ  
の比較を行う.

### 1.1 力推定アルゴリズム

力制御をおこなうためのシステムのブロック線図を Fig. 1.1 に示す. 油圧シリンダの  
head 側および rod 側の圧力と受圧面積から式 ?? を用いて推力  $f_{thrust}$  を計算して伝達関  
数  $G_{f_{thrust}2f_{measure}}$  へ入力し、その出力を推定出力  $f_{estimate}$  としてフィードバックする.  
実際に発生している実測出力  $f_{measure}$  は Load Cell により測定される.

### 1.2 PID 制御と I-PD 制御

PID 制御器 (Fig. 1.2(a)) と I-PD 制御器 (Fig. 1.2(b)) による応答を調べる. I-PD  
制御器を利用するのは、目標値の急峻な変化に対するオーバーシュートを抑制させること  
を目的とするためである.  $s/(\tau s + 1)$  は近似微分器であり、 $\tau = 0.005$  とした. 制御器に  
おけるそれぞれのゲイン  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  は  $G_{input2f_{measure}}$  に対し限界感度法を適用して  
決定し、 $K_P = 8.4$ ,  $K_I = 168$ ,  $K_D = 0.1$  とした.

それぞれの制御器におけるステップ応答を Fig. 1.3 に示す. Fig. 1.3(a) が推定値の応  
答, Fig. 1.3(b) が実測出力の応答である. Fig. 1.3(a) より推定値  $f_{estimate}$  は目標値に対  
し定常偏差なく追従している. 実測出力  $f_{measure}$  の応答は, Fig. 1.3(b) より定常偏差が  
残っていることが確認されるが、偏差は 5% 以内に収まっており、推定値をフィードバッ  
クすることにより実測出力を制御することができているといえる. また、I-PD 制御器に  
おけるオーバーシュートが PID 制御器に比べて抑制されており、I-PD 制御器を導入した

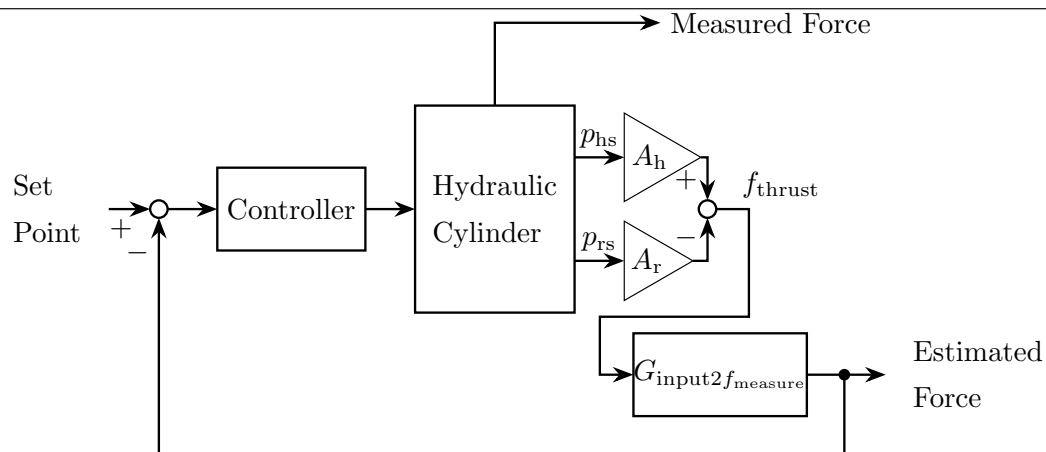


Fig. 1.1: Block Diagram for Force Control

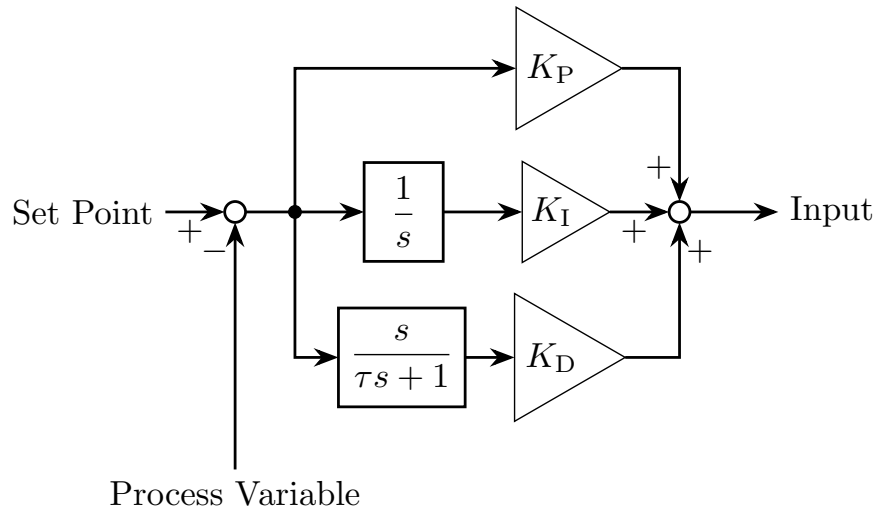
意図を満たしている.

### 1.3 $H_\infty$ 制御

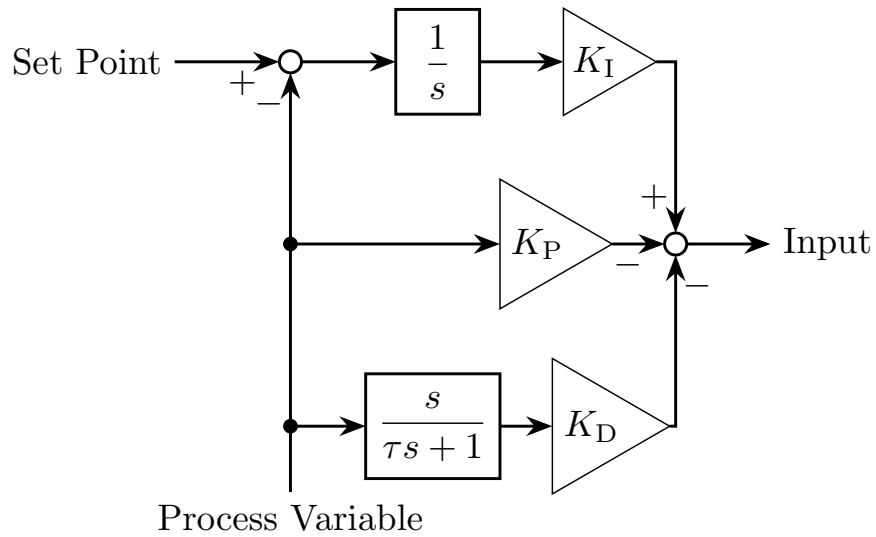
対象のシステムに対して,  $H_\infty$  制御の適用をする.  $H_\infty$  制御の適用により, モデル化誤差の吸収および外乱抑制が期待される [5, 6]. 力制御を行う際には環境との接触を伴うため, 環境から振動など様々な外乱を受けることになる. その点においても, 外乱抑制を行う制御の適用は意味あるものとなる.

#### 1.3.1 対象システムの状態空間表現

$H_\infty$  制御器を設計するにあたり, 対象システムのモデルを状態空間で表現する必要がある. なお,  $H_\infty$  制御器の設計には??節で求めた最小自乗法による伝達関数モデル,  $G_{\text{input2}f_{\text{measure}}}$  を用いる.  $G_{\text{input2}f_{\text{measure}}}$  を状態空間表現に書き直すと, 式 1.1 となる.



(a) PID Controller



(b) I-PD Controller

**Fig. 1.2:** PID and I-PD Controller

導出の詳細は付録??に示す.

$$\begin{cases} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p u_p \\ y_p &= C_p x_p \end{cases}$$

$$x_p = \begin{bmatrix} x_1(t - 0.006) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

$$u_p = u(t - 0.016)$$

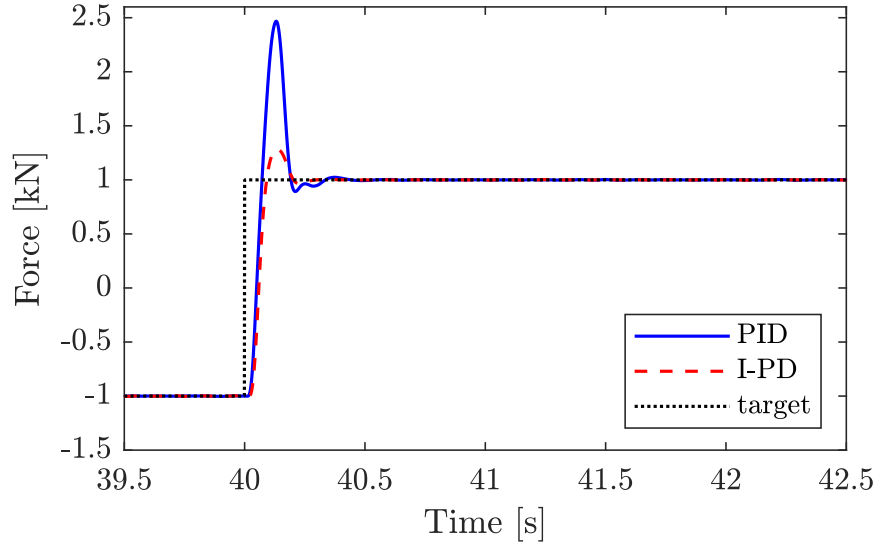
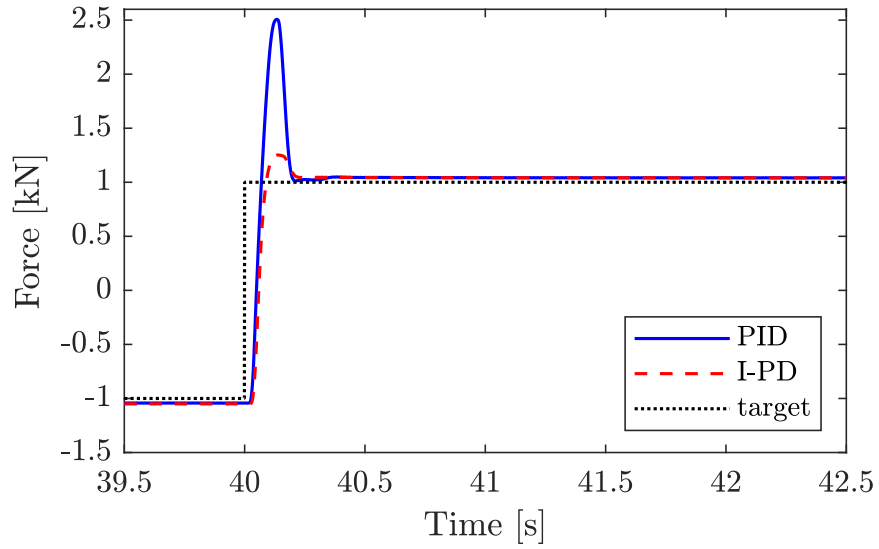
$$A_p = \begin{bmatrix} -0.34 & 0 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 3.4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

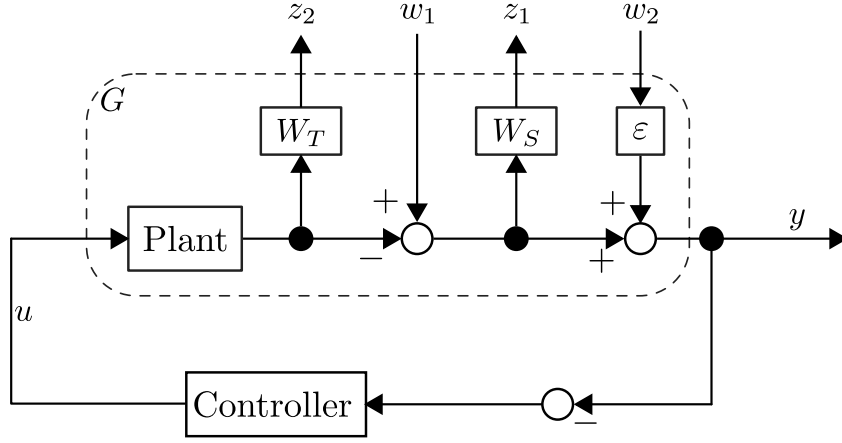
$$C_p = \begin{bmatrix} 0 & 123 \end{bmatrix}$$

(1.1)



(a) Estimated Force:  $f_{\text{estimate}}$ (b) Measured Force:  $f_{\text{measure}}$ 

**Fig. 1.3:** Sin Response of Estimated Force and Measured Force (PID Controller and I-PD Controller)

Fig. 1.4: Mixed  $H_\infty$  Synthesis

### 1.3.2 $H_\infty$ 制御器の設計

$H_\infty$  制御器の設計にあたってはむだ時間をそのまま扱うことはできないため、(i) むだ時間を無視した場合のコントローラ  $K_{H_\infty \text{ servo}}$  と (ii) むだ時間を 1 次で Padé 近似した場合のサーボ系コントローラ  $K_{H_\infty \text{ servo}}^{\text{Padé}}$ 、それぞれの設計を行う。制御器を設計するシステムは Fig. 1.4 で示す出力端混合感度問題であり\*<sup>1</sup>、破線で囲まれた部分を一般化プラントとして取扱う。Fig. 1.4 中の各パラメータは式 1.2 とし、コントローラを設計する。設計手法の詳細は付録??に示す。

$$W_T = \frac{15(s+10)}{s+400} \quad (1.2)$$

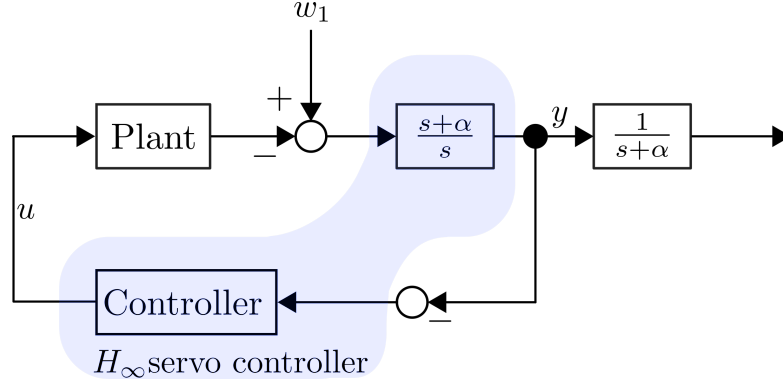
$$W_S = \frac{5}{s+0.1} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon = 0.001 \quad (1.4)$$

### 1.3.3 サーボ系 $H_\infty$ 制御器

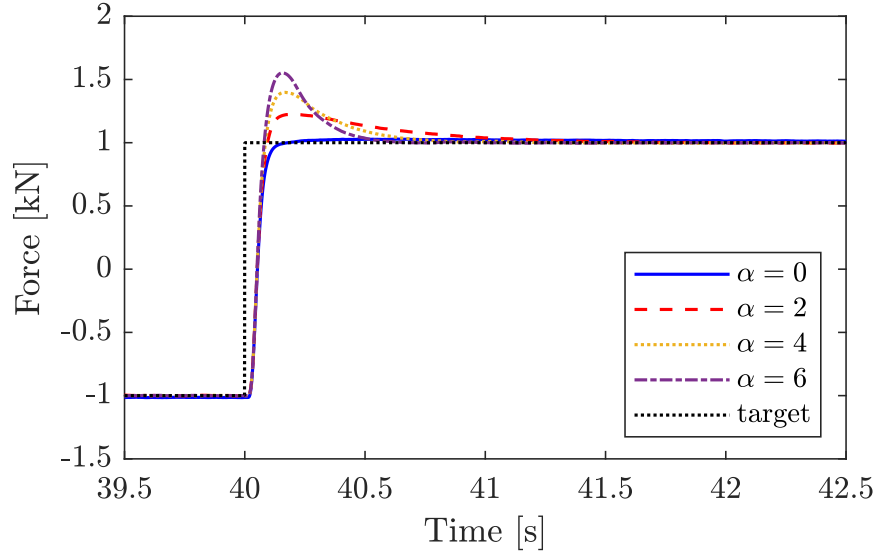
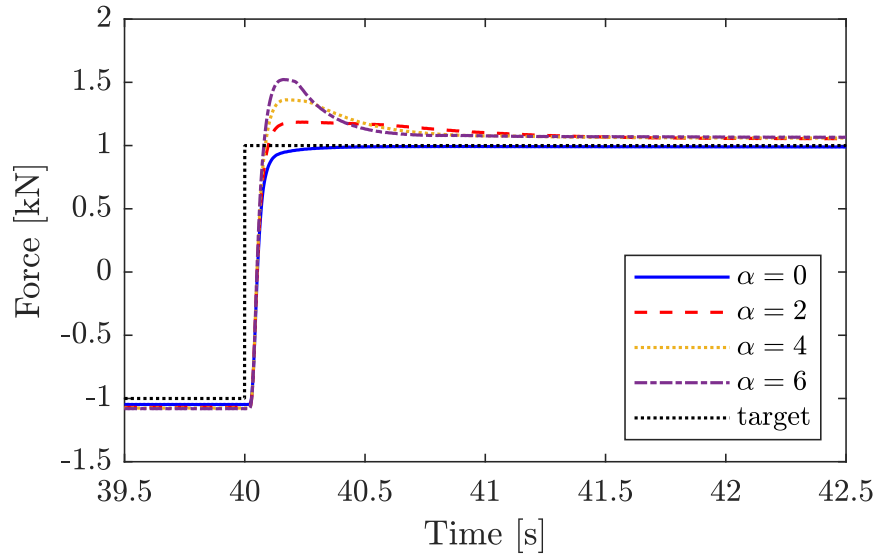
1.3.2 節で設計した  $H_\infty$  制御器をサーボ系に適用するため、コントローラに積分器を導入する。一般に使用される  $1/s$  の形の積分器はコントローラから見ると不可観測かつ不安定になる [5]。そこで、 $(s+\alpha)/s$  の形の積分器を、Fig. 1.4 を Fig. 1.5 のように書き直して導入することで、サーボ系を構築することができる。 $\alpha$  の値は正の実数であれば

\*<sup>1</sup> SISO システムの場合入力端混合感度問題と出力端混合感度問題は同一であり、本研究で扱っている対象のシステムは SISO システムである。

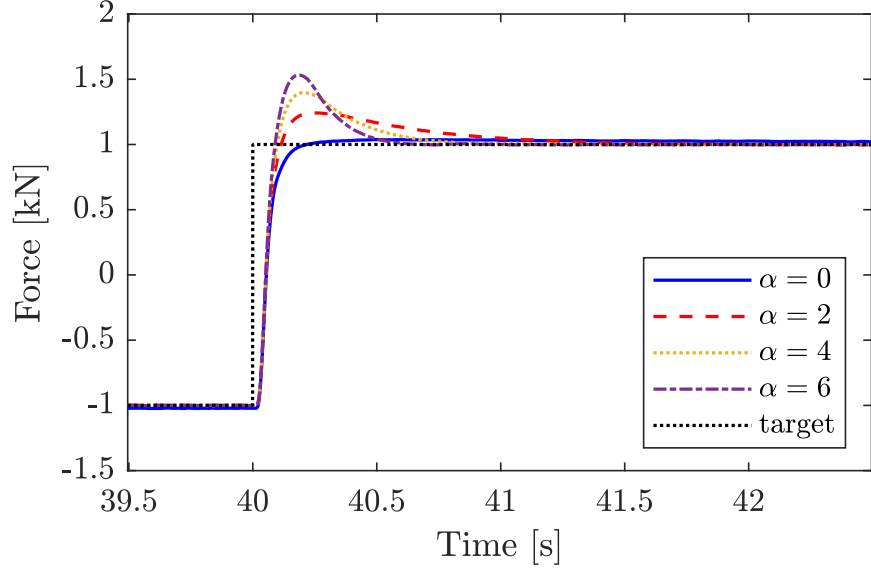
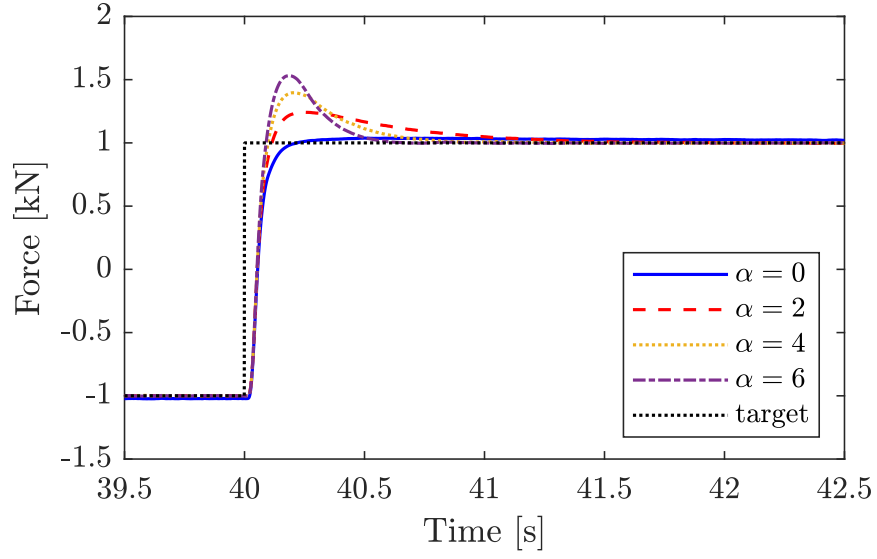


**Fig. 1.5:** Servo  $H_\infty$  Controller

任意である． $\alpha$  の値を 0 から 6 まで 2 ずつ変化させて，ステップ応答を比較した結果を Fig. 1.6 および Fig. 1.7 に示す．Fig. 1.6 がむだ時間を無視して設計したサーボ系コントローラ  $K_{H_\infty \text{ servo}}$  を用いたときの応答，Fig. 1.7 がむだ時間を Padé 近似して設計したサーボ系コントローラ  $K_{H_\infty \text{ servo}}^{\text{Padé}}$  を用いたときの応答を示す．また，それぞれ，(a) が推定値の応答，(b) が実測出力の応答である．Fig. 1.6(a) および Fig. 1.7(a) において目標値に定常偏差なく追従していることから，設計したコントローラはどちらもサーボ系を構成できていることが確認できる． $\alpha$  が増大するごとに，収束時間が早く，オーバーシュートが大きくなっていることが確認でき，これらの兼ね合いから本研究では今後， $\alpha = 4$  としたサーボ系  $H_\infty$  制御器を用いる．

(a) Estimated Force:  $f_{\text{estimate}}$ (b) Measured Force:  $f_{\text{measure}}$ 

**Fig. 1.6:** Step Response of Estimated Force and Measured Force ( $H_\infty$  servo controller w/o dead time)

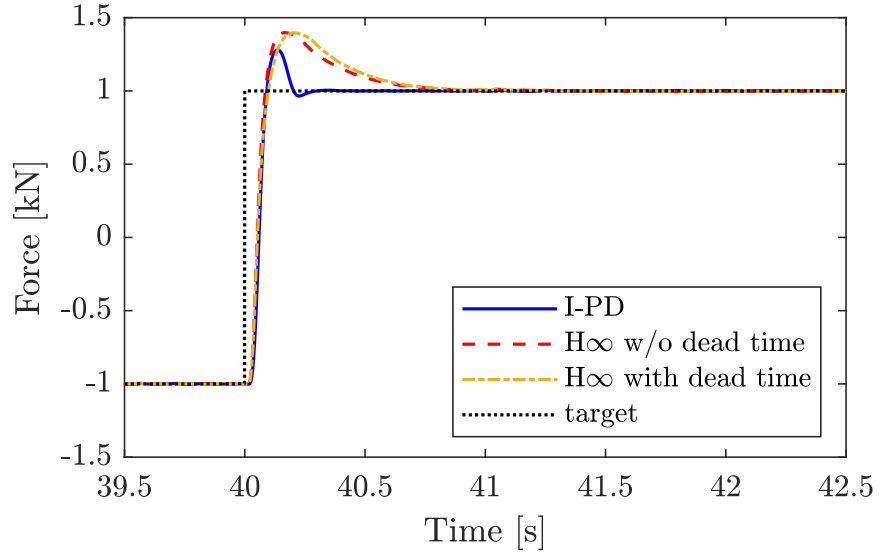
(a) Estimated Force:  $f_{\text{estimate}}$ (b) Measured Force:  $f_{\text{measure}}$ 

**Fig. 1.7:** Step Response of Estimated Force and Measured Force ( $H_\infty$  servo controller w/ Padé approximation of dead time)

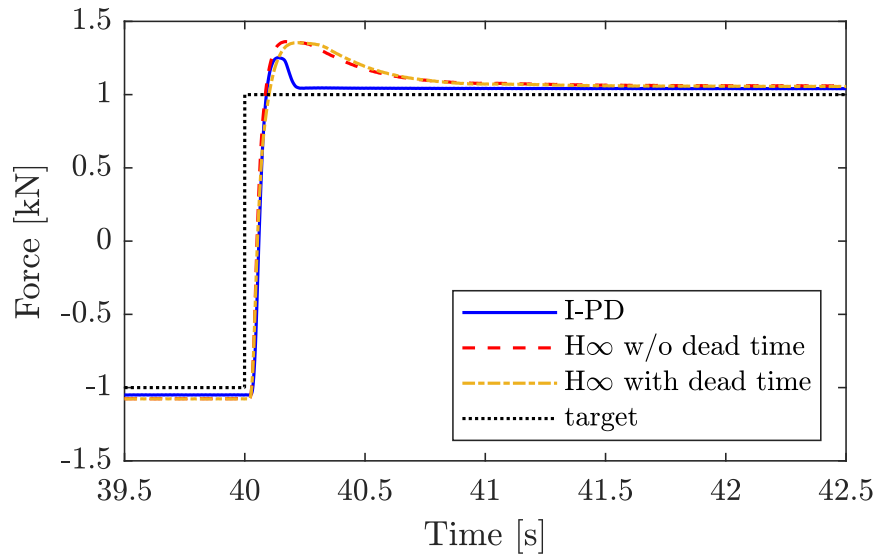
## 1.4 I-PD 制御と $H_\infty$ 制御の応答および外乱抑制効果の比較

I-PD 制御器と 1.3.3 節で設計したサーボ系  $H_\infty$  制御器の応答，及び外乱が応答へ与える影響の比較を行う．目標値として，ステップ目標および正弦波目標  $f_{\text{target}} = \sin(t)$  を与える．ステップ目標を与えたときの応答を Fig. 1.8 に，正弦波目標を与えたときの応答を Fig. 1.9 に示す．Fig. 1.8 より，I-PD 制御が最もオーバーシュートが少なく，整定時間も早いことが確認できる．また，正弦波目標に対してはどの制御器を用いても目標値に追従しているが，実測出力  $f_{\text{measure}}$  は正弦波目標に対して遅れていることが確認できる．

次に，外乱を加えたときの応答について比較を行う．

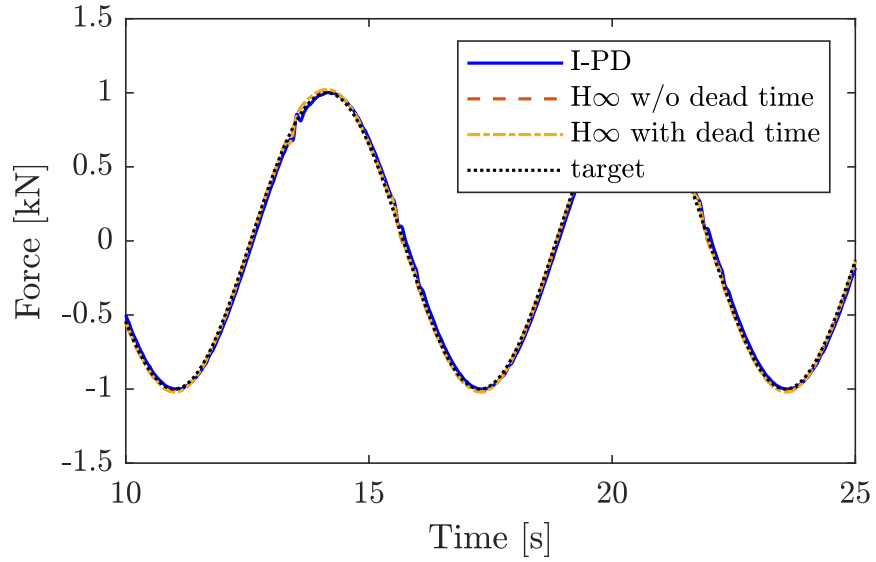


(a) Estimated Force:  $f_{\text{estimate}}$

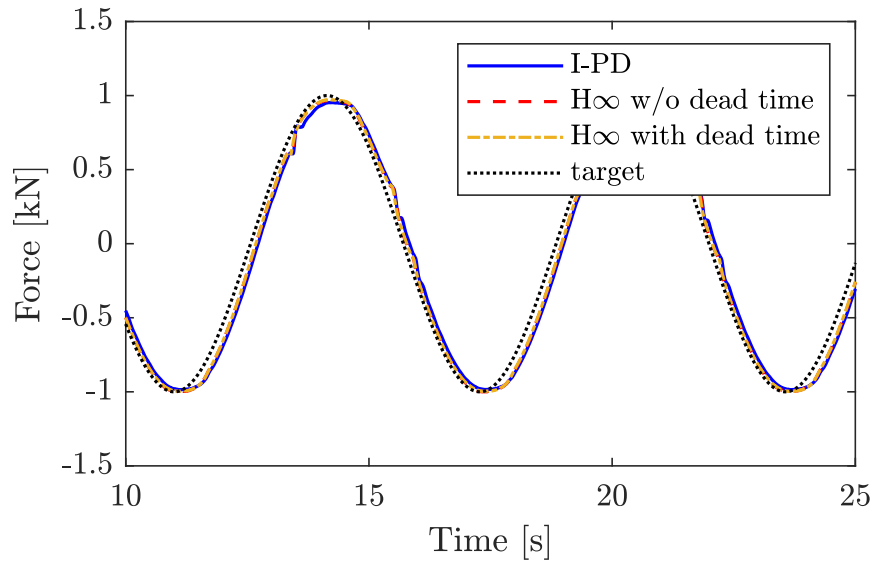


(b) Measured Force:  $f_{\text{measure}}$

**Fig. 1.8:** Step Response of Estimated Force and Measured Force



(a) Estimated Force:  $f_{\text{estimate}}$



(b) Measured Force:  $f_{\text{measure}}$

**Fig. 1.9:** Sin Response of Estimated Force and Measured Force



## 参考文献

- [1] Claudio Semini, Nikos G Tsagarakis, Emanuele Guglielmino, and Darwin G Caldwell. Design and experimental evaluation of the hydraulically actuated prototype leg of the hyq robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3640–3645. IEEE, 2010.
- [2] Claudio Semini. Hyq-design and development of a hydraulically actuated quadruped robot. *Doctor of Philosophy (Ph. D.), University of Genoa, Italy*, 2010.
- [3] 川端健太郎, 西拓紀, 鳥居裕貴, 北浦誠人, 兼松宏多, 玄相昊. 1a1-i02 油圧式 4 脚歩行ロボット rl-a1 の開発 (力制御型液圧駆動ロボット (1)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, pp. 1A1–I02\_1. 一般社団法人 日本機械学会, 2014.
- [4] 岡田大貴, 横小路泰義, 田崎勇一, 吉灘裕, 中村晋也, 倉鋪圭太. 多自由度油圧駆動ロボットのシリンダ圧に基づく手先負荷力推定による力覚フィードバック. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2017, pp. 2A1–P06. 一般社団法人 日本機械学会, 2017.
- [5] 三平満司. 実用的な  $h_\infty$  制御の基礎. 日本油空圧学会誌, Vol. 28, pp. 4–395, 1997.
- [6] 平田光男. 実践ロバスト制御 (システム制御工学シリーズ). コロナ社, 3 2017.